



Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération



EFFETS DE L'ENFOUISSEMENT
DE PAILLE DE LUZERNE
DANS LE SOL

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE EN MODÈLES DE LABORATOIRE

Paul de BOISSEZON
Gérard BELLIER
Jean-Claude BRION
Joël FARDOUX
Evelyne GAVINELLI

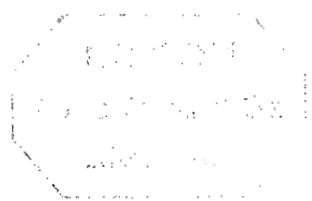
22/1/92

Document ORSTOM Montpellier, 1992, n° 10

Paul de BOISSEZON*, Gérard BELLIER**, Jean-Claude BRION**,
Joël FARDOUX*, Evelyne GAVINELLI*

EFFETS DE L'ENFOUISSEMENT DE PAILLE DE LUZERNE DANS LE SOL

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE EN MODÈLES DE LABORATOIRE



ORSTOM
ROI

Montpellier ORSTOM 1992

H2000-70202
2 exp FDI
Non Humain
F 38548

*ORSTOM, 911, avenue Agropolis B.P. 5045 34032 Montpellier cedex 1- France
**ORSTOM, 72, route d'Aulnay 93143 Bondy cedex - France

Les opinions exprimées dans ce document
n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs

Ce travail de recherche a été réalisé sous la direction de P. de BOISSEZON. La phase expérimentale a été assurée par le Laboratoire des matières organiques des sols du centre ORSTOM de Bondy ; la phase analytique et l'interprétation des résultats ont été achevées dans le Laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés du centre ORSTOM de Montpellier.

© Centre ORSTOM de Montpellier, 1992

INTRODUCTION

L'incorporation de résidus végétaux ou d'amendements organiques dans l'horizon A_p du sol modifie rapidement le compartiment des matières organiques labiles et les propriétés physiques ou chimiques qui sont dépendantes, qualitativement et quantitativement, de ces composés organiques dont l'espérance de vie est limitée. Une partie des effets de cet enrichissement en matières organiques sont donc éphémères, spécialement dans les sols bien drainés des pays chauds et humides (JENKINSON et al. 1977); de plus l'apport de composés organiques a souvent une action stimulante sur la décomposition des matières organiques préexistantes dans le sol (JENKINSON 1971).

La réalisation au champ du suivi comparé de l'évolution des matières organiques enfouies dans le sol et des propriétés physico-chimiques qui en dépendent, se heurte à différentes difficultés liées à l'hétérogénéité du sol, à l'inégale répartition des doses apportées, au remaniement des couches du sol par le labour, aux interactions avec le développement des cultures (BOISSEZON et al. 1986).

Pour pallier ces difficultés et étudier la cinétique à court terme (six mois) dans des conditions de température et hydriques contrôlées, des modèles de laboratoire ont été réalisés avec deux horizons d'un sol brun sur limon. L'horizon A a été enrichi avec différentes doses de paille de luzerne et placé dans des allonges sur l'horizon B. Le grand nombre de répétitions a permis d'arrêter l'évolution des modèles après différents temps d'incubation et donc de suivre le devenir des matières organiques et l'évolution du complexe absorbant et des cations échangeables dans les horizons du modèle. Les résultats obtenus sont rapportés dans deux chapitres qui portent sur les points suivants:

- I. Evolution des matières organiques,
- II. Evolution du complexe d'échange cationique.

La confrontation de l'évolution des caractéristiques des horizons des modèles, avec les flux de matières organiques et minérales recueillies dans les percolats, permet d'établir des bilans du carbone, de l'azote, des différents cations, et de se faire une idée du fonctionnement de ces systèmes-sol dans des conditions contrôlées, relativement simples.

- 1ère Partie -

```
+++++  
+                                     +  
+  EVOLUTION DES MATIERES ORGANIQUES  +  
+                                     +  
+++++
```


La suppression des cultures fourragères dans l'assolement de la zone céréalière, par suite de la quasi disparition de l'élevage, le brûlage des chaumes et la diminution des restitutions végétales, l'intensification et l'approfondissement du travail du sol ont conduit dans les pays tempérés de l'Europe de l'ouest à une dilution des matières organiques dans le profil cultural et surtout depuis une vingtaine d'année à une baisse du stock d'humus dans les terres cultivées (FARDEAU et al.1988).

Dans les pays inter-tropicaux, le raccourcissement voire la suppression de la jachère dans les zones densément peuplées ont conduit à une diminution encore plus rapide des stocks organiques dans les terres, qui s'accompagne d'une dégradation de la structure et d'une perte de la fertilité. Cette baisse de la production des terres entraîne une diminution des restitutions végétales. Ce cercle vicieux est d'autant plus dramatique que les politiques de fertilisation minérale de redressement se heurtent pour ces terres à des difficultés techniques et de rentabilité économique en particulier pour les cultures vivrières.

Dans les deux cas, l'enfouissement de fumier, compost, engrais vert et plus simplement de pailles ou autres résidus végétaux est préconisé pour remonter le statut organique du sol et par voie de conséquence améliorer les propriétés physiques et la fertilité chimique des terres. Néanmoins le suivi des transformations rapides de ces amendements organiques dans les champs cultivés est difficile à réaliser et les effets à court terme sur les propriétés physiques, chimiques ou biologiques du sol sont rarement significatifs.

La plus grande partie des constituants organiques non-lignifiés provenant des matières végétales incorporées dans les sols se minéralisent rapidement ou viennent abonder un compartiment de matières organiques labiles, dont le temps de résidence est de l'ordre de quelques semaines. Par contre, les composés organiques résiduels et les matières humiques formées enrichissent un compartiment relativement stable, dont le temps de résidence moyen ne peut être évalué que par des expériences pluriannuelles avec des apports organiques répétés.

L'objectif principal des expériences en modèles de laboratoire qui ont été réalisées, est donc d'étudier pendant six mois, la nature et la dynamique des matières organiques labiles qui proviennent de la décomposition des matières végétales enfouies, ou qui préexistent dans l'horizon A du modèle. Le deuxième objectif est de soumettre le modèle à un régime percolatif hebdomadaire modéré, afin d'étudier l'entraînement par les eaux gravitaires de composés organiques hydrosolubles, et l'enrichissement temporaire ou définitif de l'horizon B, ainsi que les pertes de matières organiques ou d'éléments minéraux dans les percolats recueillis à la partie inférieure des modèles.

1.1. MATERIEL ET METHODES

=====

1.1.1. SOL UTILISE ET CONSTITUTION DES MODELES

Le sol utilisé est un sol brun forestier faiblement lessivé, ou Brunisol luviq (AFES 1992), développé sur limon des plateaux du Bassin parisien, prélevé dans le parc de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon près de la porte de Folville. L'horizon A₁ possède un humus de type mull acide. L'horizon B neutre s'est développé dans un loess décalcifié. (cf. tabl.1)

Le dispositif expérimental (modèle A+B) a été réalisé en garnissant des allonges de verre avec la terre séchée, tamisée (2mm) et homogénéisée: 250g de l'horizon A₁ (0-10cm) et 150g de l'horizon B₂ (70-90cm) de ce sol brun sur limon (fig. 1).

À la partie inférieure des allonges, on a placé un tampon de laine de verre et un lit de sable quartzueux grossier soigneusement lavé par les acides. L'horizon B du modèle a été séparé du lit de sable et de l'horizon A du modèle par des disques de gaze de Tergal.

Les quatre doses (F₁, F₂, F₃ et F₄ : 0 - 2,5 - 5 et 7,5 %) de paille de luzerne séchée, hachée et calibrée (0,2 à 2mm) ont été ajoutées aux 250g de sol de l'horizon A₁, soigneusement mélangées avant remplissage à sec et sans à-coup de la partie supérieure de chaque allonge.

Un dispositif expérimental simplifié (modèle A), qui ne comporte pas d'horizon B, permet d'apprécier l'influence de cet horizon sur la lixiviation des matières organiques et minérales hydrosolubles ainsi que sur les pertes par drainage.

Conditions d'incubation:

L'humectation a été réalisée "per ascensum" en plongeant les allonges garnies à sec dans un seau d'eau distillée pendant une nuit (t = 0), afin de chasser les bulles d'air et pour être certain que tous les modèles ont été également humectés.

Le lendemain matin (t = 1) les allonges ont été placées sur des portoirs dans des étuves à 28°C, à l'abri de la lumière, dans une atmosphère maintenue humide par la présence d'un bac d'eau.

Les solutions provenant du ressuyage des allonges ont été recueillies dans des erlenmeyers, placés en permanence à la base des allonges sur les portoirs. Elles constituent les percolats du premier jour. À la fin du ressuyage, les allonges ont été pesées.

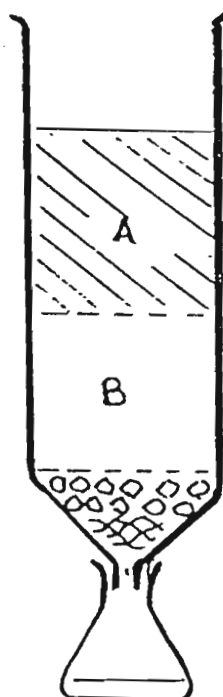
Tous les huit jours, les allonges ont été réhumectées en versant de l'eau déminéralisée à la partie supérieure du modèle jusqu'au poids correspondant à l'humidité au point de ressuyage plus 10 ml. À la fin du ressuyage, les percolats sont rassemblés par période d'incubation et conservés au réfrigérateur avec une goutte de chlorure mercurique.

Durées d'incubation:

L'incubation de deux allonges par dose a été arrêtée au bout de : 1, 15, 30, 90 et 180 jours. Les carottes de sol expulsées des allonges ont été séchées rapidement dans une étuve ventilée à 60°C. Les horizons A et B des modèles ont été séparés, passés au travers d'un tamis de 2 mm, et analysés séparément.

FIGURE 1

MODELES DE LABORATOIRE
pour l'étude de la
DECOMPOSITION DE LA PAILLE DE
LUZERNE CALIBREE
DANS UN SOL BRUN SUR LIMON



Modèle A + B

Horizon A₁ (0-10 cm) : 250 g tamisé 2 mm
+ doses de paille de luzerne calibrée (0,2-2 mm)

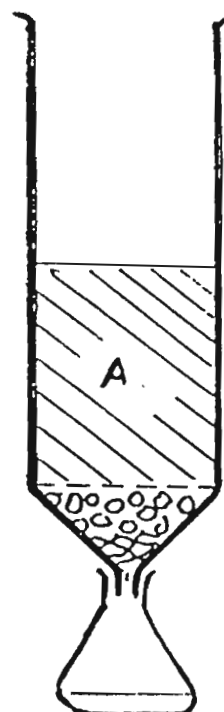
Horizon B₂ (70-90 cm) : 150 g tamisé 2 mm

Toile gaze Tergal

Sable quartzeux grossier

Laine de verre

Percolats stabilisés par HgCl₂ et conservés
au réfrigérateur jusqu'à analyse.



Modèle A seul

Doses de paille (% de l'hor. A)	C (%) ajouté	Durées d'incubation (jours) (modèles A+B)					(modèle A)	
		1	15	30	90	180	180	
F1	0	0	xx	xx	xx	xx	xx	xx
F2	2,5	0,98	xx	xx	xx	xx	xx	xx
F3	5,0	1,90	xx	xx	xx	xx	xx	xx
F4	7,5	2,79	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Conditions d'incubation : température constante 28°C, atmosphère humide, obscurité.

Régime hydrique : alterné : humectation initiale per ascensum, réhumectation hebdomadaire à la capacité de fin de ressuyage + 10 ml.

TABLEAU 1

CARACTERISTIQUES DU SOL BRUN FORESTIER SUR LIMON
 et de la paille de luzerne ajoutée dans l'horizon A des modèles

Caractéristiques horizon du sol horizon du modèle	Sol brun forestier			Paille de luzerne (0,2-2mm)	Caractéristiques des sols utilisés Horizons du modèle	Sol brun forestier		Paille de luzerne
	A1 A	B2 B				A	B	
Mat.org. C mg/g	25,6	3,94	402	:	Argile < 0,002mm	21,2	26,9	séchée
----- N mg/g	2,67	0,48	28,29	:	Limon f,0,002-0,02	20,2	19,7	hachée et
Rapports C/N %	9,6	8,3	14,21	:	Limon gr,0,02-0,05	41,1	42,2	calibrée :
				:	Sables f,0,05-0,2	10,7	8,3	
Matières Humiques (C mg/g)				:	Sables gr,0,2-2mm	1,1	0,3	(0,2-2mm)
Mat.Orga.légères	0,84	0,07	250	:	CEC (pH:7) me/100g	19,84	17,30	57,05me/100g
Ac.Fulv.Libres	1,88	0,32	82,2	:	Bases Ca me/100g	9,60	11,76	Ca tot. 95,5
Ac.Hum. Pyro.	0,98	0,15	34,4	:	échang. Mg -id-	2,17	2,05	Mg tot. 14,0
Ac.Fulv.Pyro	2,62	0,21	5,9	:	K -id-	0,39	0,40	K tot. 65,2
Ac.Hum. Soude	0,61	0,02	23,1	:	Na -id-	0,14	0,16	Na tot. 2,2
Ac.Fulv.Soude	3,43	0,28	5,6	:	pH (H2O)	5,5	7,1	Fe tot. 7,0
Humine	15,25	2,89		:	pH (KCl)	4,8	5,9	Al tot. 33,9
N.B. Cmg/g ou teneur en carbone pour mille.				:	Humidité pF:2,5	27,7	26,4	
Les Bases échangeables, les capacités d'échange				:	-id- pF:4,2	15,0	13,9	
cationique et les teneurs en Bases Totales sont :				:				

exprimées en me/100g ou cmol(+) kg-1

La teneur en carbone des matières organiques légères de la paille a été calculée en retranchant de la teneur en carbone total la somme des teneurs en carbone des matières humiques extractibles.

1.1.2. METHODES ANALYTIQUES:

C et N: La détermination des teneurs en carbone et azote total des horizons des modèles a été réalisée sur un sous-échantillon prélevé au partiteur et broyé finement (inf. à 150 μm). Le carbone total est mesuré par combustion au four tubulaire à 1250°C, parcouru par un courant d'oxygène et le dosage du gaz carbonique effectué au coulomètre. L'azote total a été dosé par attaque acide Kjeldhal et distillation de l'ammoniac.

L'ammonium échangeable est extrait par KCl, 1N et dosé à l'autoanalyseur Technicon II, par la réaction de Berthelot au bleu d'indophénol.

L'ammonium non-échangeable (fixé) est déterminé après destruction préalable des matières organiques par l'hypobromite de potassium, et extraction de NH_4^+ échangeable par KCl, 1N. L'ammonium extrait par le mélange HCl-HF (24 heures à froid) est distillé en présence de potasse par entraînement à la vapeur d'eau, recueilli dans l'acide borique puis titré par l'acide sulfurique (KEENEY et al. 1982).

Les polysaccharides présents dans les horizons du modèle ont été estimés par dosage des sucres réducteurs dans les hydrolysats acides des échantillons de sol, d'abord à froid pendant 19 heures par H_2SO_4 , 25N, puis à 80°C pendant 4 heures après dilution 5/1. Après centrifugation et neutralisation par la soude, le dosage de l'équivalent glucose a été réalisé selon la méthode préconisée dans (TECHNICON autoanalyser methodology 1964): Après dialyse, les sucres réduisent le ferricyanure de potassium en milieu alcalin, à 95°C et l'on compare la disparition de la couleur à 420 nm à celle obtenue avec une gamme de glucose.

Le fractionnement chimique des matières humiques a été réalisé selon la méthode Dabin (1976) par agitation préalable de l'échantillon de sol dans H_3PO_4 , 2M, centrifugation et séparation, par filtration du surnageant, des matières organiques légères (MOL) et des acides fulviques libres (AFL). Le culot de centrifugation est soumis ensuite à des extractions successives jusqu'à épuisement des matières humiques: acides humiques (AHP) et fulviques (AFP) extraits par le pyrophosphate de sodium N/10, puis dans la soude N/10 (AHS) et (AFS). La séparation des acides humiques et fulviques est obtenue en flocculant les acides humiques par acidification à pH : 1,5. Le dosage des MOL recueillies sur filtre et des matières organiques non-extractibles restant dans le culot final d'humine (HUM) a été réalisé à l'analyseur élémentaire CHN (Carlo Erba) ou au (CHN Leco 600). Les teneurs en carbone des matières humiques (MH) et des acides fulviques (AF) ont été déterminées par oxydation par le mélange sulfochromique à chaud et titrage en retour par le sel de Mohr; les teneurs en carbone des acides humiques ont été obtenues par différence (C-MH)-(C-AF).

Le fractionnement chimique des matières humiques dans la paille de luzerne sèche a été réalisé par la même méthode, en filtrant les solutions d'extraction sur un tampon de laine de verre, et en agitant le tampon de laine de verre contenant les résidus végétaux dans la solution d'extraction suivante. Le résidu restant dans le tampon de laine de verre après la dernière extraction par la soude et rinçage à l'eau, est séché et broyé finement. Le carbone et l'azote de cette fraction (humine résiduelle) ont été dosés à l'analyseur élémentaire CHN. En dosant sur une autre extraction l'azote contenu dans le résidu de l'extraction phosphorique initiale (MOL), on peut calculer l'azote contenu dans les acides fulviques libres (N-AFL) = (N-total) - (N-MOL)

et dans les matières humiques totales (N-MHT) = (N-total) - (N-AFL) - (N-Humine).

Fractionnement granulométrique: La méthode utilisée est intermédiaire entre la technique FELLER (1979) et celle de BRUCKERT et al. (1980). Les fractions granulométriques ont été obtenues par agitation du sol dans l'eau avec des billes de verre pendant une heure, sans traitement par les ultrasons, et tamisages successifs à 200 µm (refus appelé fraction SG) et à 50 µm (fraction SF) en s'aidant d'un jet de pissette tangentiel. La fraction inférieure à 50 µm (fraction AL) est séparée des eaux de lavage (fraction W) par centrifugation et ultrafiltration du surnageant sur microfiltre (0,2 µm). Le dépôt d'argile récupéré sur le microfiltre est joint au culot de centrifugation (AL). Après séchage, les fractions de la taille des sables grossiers (SG), des sables fins (SF), de l'argile et des limons (AL) sont pesées; les teneurs en carbone et azote sont déterminées à l'analyseur CHN sur une aliquote finement broyée (inf. à 150µm). La fraction (W) est concentrée par évaporation presque complète à l'étuve à 60°C. Les teneurs en carbone et azote ont été mesurées à l'analyseur élémentaire CHN sur une aliquote, absorbée sur terre d'infusoire, séchée à poids constant à l'étuve à 60°C.

La teneur en polysaccharides hydrosolubles, a été déterminée sur une aliquote de la fraction (W), après hydrolyse par H₂SO₄, 12N à 100°C pendant 3 heures. L'hydrolysate est neutralisé par la soude, et la titration des sucres réducteurs est réalisée comme ci-dessus à l'autoanalyseur Technicon par dialyse et réduction du ferricyanure de potassium en milieu alcalin.

Analyse de C et N dans les percolats: Les percolats rassemblés par traitement et par période d'incubation ont été conservés au réfrigérateur avec quelques gouttes de chlorure mercurique. Une partie aliquote des percolats a été absorbée sur terre d'infusoire et séchée dans des capsules en téflon à 60°C. Le dosage des teneurs en carbone et en azote dans les poudres ainsi obtenues a été réalisé à l'analyseur élémentaire CHN Leco 600.

1.2. EVOLUTION DES TENEURS EN CARBONE DANS LES MODELES

=====

Le dosage du carbone organique total dans les horizons A et B des modèles nous permet de faire un bilan global de l'évolution en fonction du temps d'incubation des matières organiques provenant des deux horizons du sol et de la paille de luzerne ajoutée à différentes doses dans l'horizon A. L'excès d'eau apporté à la faveur de la réhumectation hebdomadaire doit entraîner une partie des matières organiques dans l'horizon B des modèles et dans les percolats recueillis à la base des colonnes. Avant d'établir un bilan d'ensemble, il convient d'étudier l'évolution des teneurs en carbone dans chacun des horizons des modèles (cf.annexe 1).

1.2.1. EVOLUTION DES TENEURS EN CARBONE DANS L'HORIZON A

La teneur en carbone de l'horizon A des modèles est fonction à la fois des doses de paille de luzerne ajoutées, et du temps d'incubation (fig.2).

Influence des doses de paille ajoutées:

=====

Pour chaque durée d'incubation, les teneurs en carbone restant dans l'horizon A (exprimées en mg de C par g de sol) sont proportionnelles aux doses de carbone apportées par la paille de luzerne (tabl.2 et fig.3):

$$(1) \quad (C \text{ restant}) = a + b \times (C_{PL} \text{ ajouté})$$

Ce résultat confirme la proportionnalité observée par JENKINSON (1971 et 1977) entre le carbone minéralisé et le carbone végétal enfoui.

Les valeurs du coefficient "a" des équations (1) correspondent à la teneur en carbone restant dans l'horizon A du modèle, au temps t, pour un apport de paille nul. Elles sont très proches des teneurs moyennes en carbone restant au temps t dans les modèles (F₁) sans apport de paille. L'interaction ou effet de la paille sur la décomposition du carbone du sol peut être estimée par la différence entre la teneur en carbone de l'horizon A des modèles F₁ (sans apport de paille) et la valeur calculée "a" pour C_{PL} ajouté = 0 au même instant: $I_c = C_{F_1} - a$. On constate que I_c décroît au cours du premier mois, et devient nul ou très faible ensuite.

En suivant le raisonnement de PAL et BROADBENT (1975), on peut pour chaque durée d'incubation évaluer l'indice d'incitation "PR_c" ou "priming ratio". Cet indice est égal au quotient du carbone provenant du sol, perdu lorsque l'on ajoute de la paille, divisé par le carbone provenant du sol perdu sans apport de paille (modèles F₁). Si C₀ est la teneur en carbone du sol qui a été placé dans l'horizon A du modèle, $PR_c = (C_0 - a) / (C_0 - C_{F_1})$. On constate que ce rapport est de l'ordre de: 1,7 au quinzième jour, puis il devient ensuite égal ou légèrement supérieur à: 1. L'apport de paille de luzerne entraînerait donc dans les premiers jours une accélération de la décomposition du carbone organique provenant du sol de l'horizon A des modèles. A partir du trentième jour, les matières organiques du sol se décomposeraient à peu près à la même vitesse avec ou sans apport de paille, et quelles que soient les doses de paille de luzerne ajoutées.

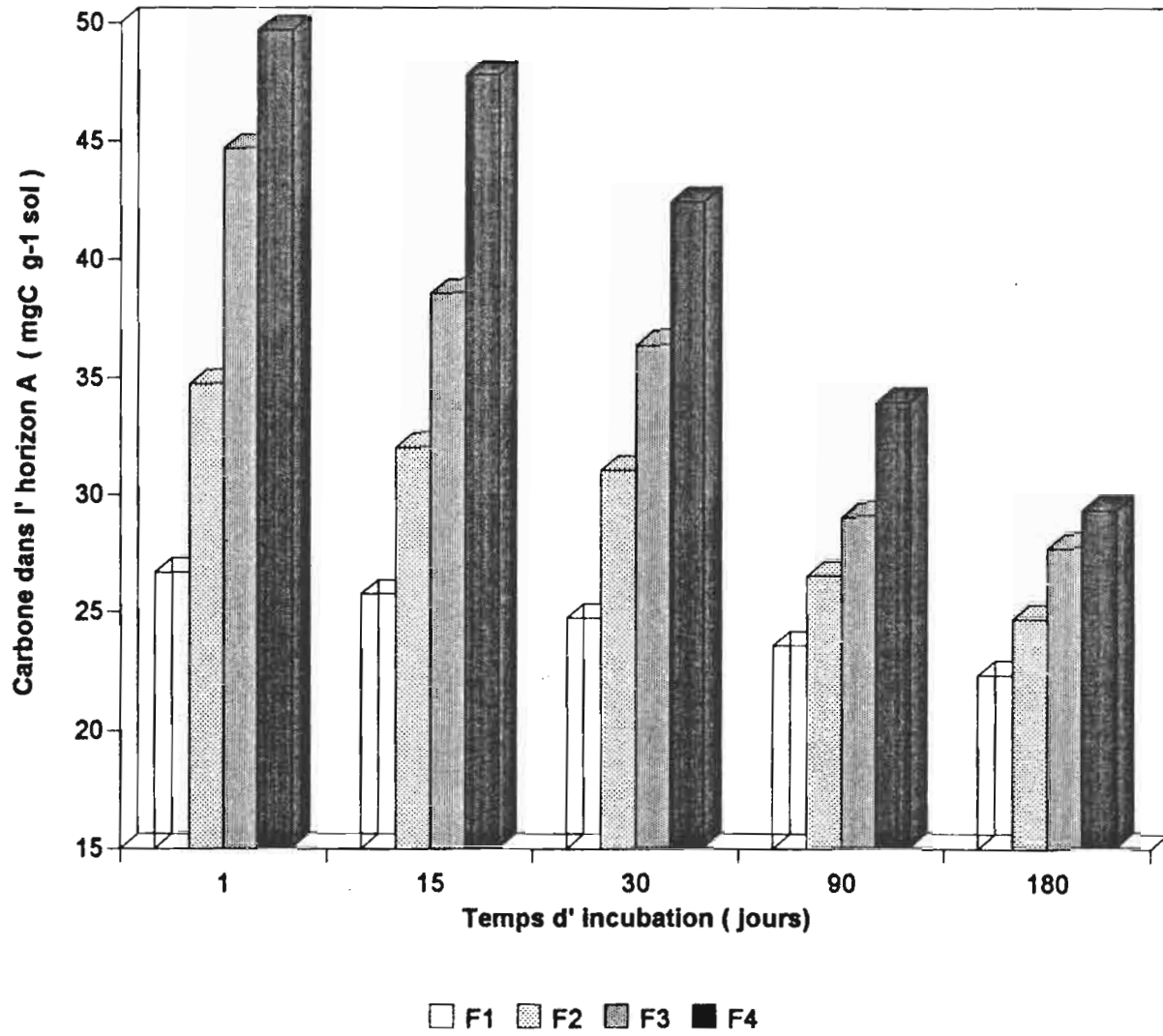
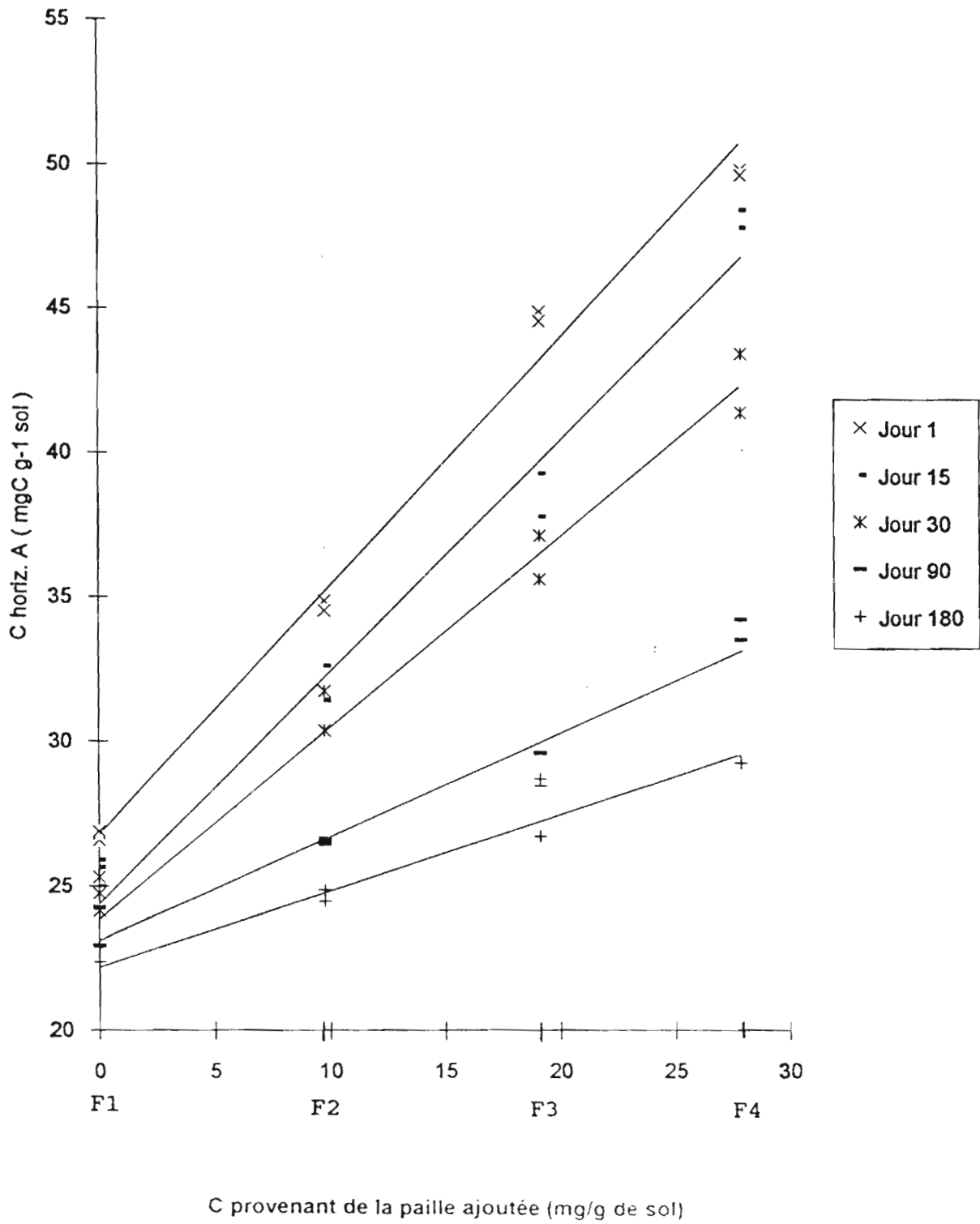


FIGURE 2

FIGURE 3

Teneurs en Carbone dans l'horizon A des modèles
en fonction de la dose de carbone de la paille
ajoutée



Le paramètre "a" peut être ajusté à une fonction exponentielle décroissante du temps "t" d'incubation exprimé en jours, sauf pour t=1:

$$a = A \times e^{-K_{ca} \times t} = 25,12 \times e^{-0,0006876 \times t} \quad R^2 = 0,947$$

$K_{ca} = 0,0006876 \text{ j}^{-1}$ est la constante de décomposition ou disparition journalière (minéralisation, volatilisation et/ou lessivage) du carbone provenant du sol de l'horizon A du modèle. L'ordonnée $A = 25,12$ de "a" pour $t=0$ est nettement inférieure à C_0 , teneur initiale en carbone du sol placé dans l'horizon A du modèle, et à C_F , après ressuyage des modèles sans apport de paille pour $t = 1$. Si nous appelons I_{c0} la différence entre ces deux termes: $I_{c0} = C_0 - A = 26,90 - 25,12 = 1,78$. Le carbone restant provenant du sol: "a" peut être évaluée par l'expression suivante:

$$a = (C_0 - I_{c0}) \times e^{-K_{ca} \times t}$$

Le paramètre " I_{c0} " ou interaction initiale relative à la décomposition du carbone du sol de l'horizon A pourrait correspondre d'une part au stock de matières organiques hydrosolubles lixiviées au cours du ressuyage, mais aussi au "flush" de minéralisation rapide du carbone du sol qui intervient après humectation des modèles. Ce "flush" paraît être amplifié par l'enfouissement de paille de luzerne dans cet horizon, mais il serait indépendant des doses de paille ajoutées, tout au moins pour la gamme de doses qui ont été comparées expérimentalement.

Par la suite, tout se passe donc comme si, après cette décroissance initiale (I_{c0}), la teneur en carbone restant dans l'horizon A des modèles est égale à la somme de la teneur en carbone restant provenant du sol ($C_0 - I_c$) et de celle provenant de la paille de luzerne C_{rp} ajoutée.

En effet, les pentes "b" des droites de régression (1) décroissent aussi avec le temps (cf. tabl.4). Elles s'ajustent assez bien à une fonction exponentielle de la durée d'incubation (t en jours):

$$b = \alpha \times e^{-K_{cp} \times t} = 0,801 \times e^{-0,00687 \times t} \quad R^2 = 0,948$$

Dans cette régression non linéaire, le terme " α " = 0,801 qui correspond à la valeur de "b" pour $t = 0$, représente la fraction du carbone de la paille qui se décompose suivant une cinétique du premier ordre, soit 80 % de C_{p1} . $K_{cp} = 0,00687 \text{ j}^{-1}$ est la constante de décomposition ou disparition journalière de cette fraction du carbone de l'horizon A qui provient de la paille de luzerne ajoutée.

Au total, l'évaluation des coefficients "a" et "b" de l'équation (1) en fonction de " I_{c0} " et du temps "t", permet d'obtenir une formule de la forme suivante:

$$(2) \quad C_t = (C_0 - I_{c0}) \times e^{-K_{ca} \times t} + \alpha \times C_{p1} \times e^{-K_{cp} \times t}$$

dans laquelle le carbone restant dans l'horizon A des modèles à l'instant t est égal à la somme du carbone restant qui provient du sol (déduction faite de I_{c0}), et du carbone restant qui provient de la paille de luzerne ajoutée. Dans cette formule (2):

C_t = la teneur en carbone dans l'horizon A du modèle à l'instant t.

$I_{c0} = 1,78$ est le stock de carbone du sol perdu au cours du ressuyage ou qui se décompose au cours des premiers jours, suite à l'humectation et à l'effet d'incitation dû à la paille de luzerne enfouie.

C_0 est la teneur en carbone du sol placé dans l'horizon A des modèles avant humectation lorsque $t=0$.

$K_{ca} = 0,0006876 \text{ j}^{-1}$ constante de disparition journalière du carbone provenant du sol

$\alpha = 0,801$ fraction du carbone de la paille de luzerne ajoutée qui est potentiellement minéralisable.
 $K_{cp} = 0,00687 \text{ j}^{-1}$ constante de disparition journalière du carbone provenant de la paille de luzerne ajoutée dans l'horizon A
 C_{p1} = teneur en carbone de l'horizon A, qui provient de la paille de luzerne ajoutée à l'instant zero, soit: $C_{p1} = 0$ pour F_1 , 9,76 pour F_2 , 19,12 pour F_3 et 27,91 mg C /g sol pour F_4
 t = durée d'incubation en jours

En résumé, l'indice d'incitation PR_c n'est supérieur à 1 qu'en début d'incubation, et l'effet d'incitation de la paille de luzerne ajoutée sur la décomposition des matières organiques du sol de l'horizon A paraît limité dans le temps et ne dépendrait pas des doses de paille ajoutées. L'effet de la paille sur la décomposition du carbone du sol ($I_c = C_{F1} - a$) correspondrait à une accélération du processus de décomposition du carbone du sol par disparition d'un facteur limitant qui entrave la décomposition d'un des compartiments organiques du sol.

Si on retranche du stock de carbone initial du sol (C_0), le stock I_{c0} correspondant au carbone organique perdu soit au cours du ressuyage, du "flush" de minéralisation dû à l'humectation et à l'effet d'incitation de la paille en début d'incubation, on constate que à chaque instant t , la teneur en carbone de l'horizon A des modèles peut être décrite comme la somme de deux fonctions exponentielles décroissantes en fonction du temps, qui correspondent aux teneurs en carbone restant provenant du sol (C_{rs}) et à celles provenant de la paille de luzerne ajoutée (C_{rp}).

Le temps de demi-vie ou demi-temps moyen de résidence ($T_{1/2} = L_N \cdot 2 / K_c$) du carbone du sol placé dans l'horizon A des modèles ($T_{1/2} = 1008$ jours) est dix fois plus élevé que celui de la paille de luzerne enfouie dans cet horizon ($T_{1/2} = 101$ j).

Cinétique d'évolution des teneurs en carbone dans l'horizon A

en fonction du temps d'incubation:

Pour chacune des doses de paille de luzerne ajoutées, on constate que les teneurs en carbone restant à l'instant t (C_t) dans l'horizon A des modèles décroissent grossièrement suivant une cinétique du premier ordre en fonction de la durée d'incubation (t en jours) (cf. tabl.3).

$$(3) \quad C_t = C_{oF} \times e^{-K_c \times t}$$

La constante de disparition journalière " K_c " (minéralisation, volatilisation et pertes par lixiviation) du carbone organique provenant indistinctement du sol et de la paille ajoutée, double par rapport au témoin (F_1) pour la dose d'apport de paille (F_2), et triple pour (F_3) et (F_4). Le temps de demi-vie ou demi-temps moyen de résidence du carbone de l'ensemble des matières organiques, provenant du sol et de la paille enfouie dans l'horizon A des modèles qui est égal à: $T_{1/2} = L_N \cdot 2 / K_c$ passe de deux ans pour (F_1) à un an pour (F_2), puis à un peu plus de 200 jours pour (F_3 et F_4), lorsque la dose de paille ajoutée augmente.

L'ordonnée C_{oF} pour $t = 0$ est nettement inférieure aux teneurs initiales calculées: teneurs C provenant du sol + C provenant de la paille ajoutée. On constate que C_{oF} augmente proportionnellement au carbone apporté par la paille entre (F_2), (F_3) et (F_4). Par contre l'augmentation de C_{oF} est nettement plus faible entre le témoin sans paille (F_1) et pour la dose la plus faible (F_2). La droite de régression de l'estimation de la teneur initiale C_{oF} en fonction du carbone apporté par la paille C_{PL} pour (F_2), (F_3) et (F_4) a pour équation:

$$C_{oF} = 25,16 + 0,85 \times C_{PL} \quad R^2 = 0,999$$

On constate que lorsque $C_{PL} = 0$, la valeur de $C_{oF} = 25,16$ est nettement inférieure à $C_o = 26,90$ teneur initiale en carbone de l'horizon A qui provient uniquement du sol, avant humectation et ressuyage. La différence entre ces deux valeurs: $I_c = C_{oF} - C_o = 1,74$ est très proche de l'estimation déjà faite du stock de carbone du sol qui est lessivé à la faveur du ressuyage initial des modèles et du carbone du sol qui se décompose au cours des premiers jours suite à l'humectation des modèles et à l'effet d'incitation dû à la paille de luzerne enfouie.

Le paramètre $\alpha = 0,85$ correspond à la fraction de l'ensemble des matières carbonées provenant du sol et de la paille qui sont potentiellement décomposable. Cette valeur de α est légèrement supérieure à l'estimation faite précédemment pour le carbone de la paille de luzerne ajoutée.

En reportant cette estimation de C_{oF} en fonction de C_o , I_c et α dans les équations (3), on obtient pour chaque dose de paille ajoutée une estimation de la teneur en carbone restant à l'instant t de la forme:

$$(3') \quad C_t = (C_o - I_c + \alpha \times C_{PL}) \times e^{-K_c \times t}$$

Dans cette équation (3') la constante journalière K_c de décomposition et de lessivage du carbone, provenant indistinctement du sol et de la paille, serait dépendante de la dose de paille de luzerne ajoutée (tabl.3). Cette équation (3') diffère donc fondamentalement de l'équation (2). Mais la médiocrité des coefficients de détermination des régressions (3) jettent un doute sur la représentativité de cette expression mathématique de la cinétique d'évolution du carbone dans l'horizon A des modèles.

TABLEAU 3

Modèle A+B	Cinétique d'évolution du Carbone				(mg C /g sol)
-----	dans l' horizon A des modèles				
	Ct = Cof * exp(-Kc * t)				(t en jours)
=====					
Fumures:	Co teneurs	- Cof -	- Kc -	- T1/2 -	- R ² -
Cpi apporté	initiales	teneurs		LDG 2/-Kc	Coefficient
par la paille	théoriques	initiales		Demi-vie	détermination

F1 (0,00)	(26,90)	26,18	-0,0010	693	0,83
F2 (9,76)	(36,02)	33,37	-0,0019	365	0,90
F3 (19,12)	(44,86)	41,29	-0,0028	248	0,82
F4 (27,91)	(52,95)	48,66	-0,0032	217	0,94
=====					

N.B: Cof = 25,16 + 0,842 * Cpi R²=0,999 pour F2,F3 et F4

1.2.2. EVOLUTION DES TENEURS EN CARBONE DANS L' HORIZON B

Les teneurs en carbone organique total de l' horizon B des modèles varient faiblement (cf.annexe 1); toutefois au cours du premier mois, l'accroissement est nettement significatif pour les modèles dont l'horizon A est enrichi en paille de luzerne.

Influence des doses de paille ajoutées dans l' horizon A

Pour chaque durée d'incubation, les teneurs en carbone dans l'horizon B des modèles augmentent en fonction de C_{p1} , teneur initiale en carbone provenant de la paille ajoutée dans l'horizon A. Toutefois l'étude des régressions :

$$(4) \quad C_{NB} = C_{NB(0p1)} + \gamma \times C_{p1}$$

montre que la relation (4) n'est qu'approximativement linéaire (tabl.4). La pente " γ " de ces droites est dix à trente fois plus faible que la pente " α " obtenue pour l'horizon A. Elle varie dans le temps, augmente pendant le premier mois, puis décroît de moitié ensuite; c'est à dire que la lixiviation du carbone organique de la paille provoque pendant le premier mois une augmentation nette de la teneur en carbone dans l'horizon B qui s'accroît avec le temps d'incubation et les doses de paille ajoutées. Par la suite, la baisse de " γ " correspond à un appauvrissement net de l'horizon B en matière organique; mais au sixième mois, l'influence de C_{p1} sur C_{NB} est encore sensible, et l'enrichissement net en carbone de l'horizon B est encore significatif.

L'ordonnée à l' origine $C_{NB(0p1)}$ de ces droites de régression fournissent une estimation de la teneur en carbone de l'horizon B sans apport de paille. Elles diffèrent très peu des teneurs mesurées pour le traitement F_1 . On constate que sans apport de paille dans l' horizon A, il y a néanmoins une faible lixiviation de matières organiques de l'horizon A humifère et une légère accumulation de carbone organique dans l'horizon B; mais au bout de six mois les teneurs en carbone $C_{NB(0p1)}$ et $C_{NB(t1)}$ sont redevenues égales à la teneur initiale en carbone du sol placé dans l'horizon B des modèles.

Cinétique d' évolution des teneurs en carbone de l' horizon B

Pour chacune des doses de paille ajoutées dans l'horizon A, le suivi en fonction de la durée d'incubation des teneurs en carbone dans l' horizon B montre (fig.4) un accroissement rapide pendant une période de 15 jours pour les traitements F_1 et F_2 à environ 20 et 25 jours pour F_3 et F_4 . L'estimation des valeurs maximales montre un enrichissement net de l'horizon B, qui s'échelonne suivant les traitements entre 12 et 45 % des teneurs initiales en carbone.

Par la suite, on observe une décroissance lente au cours des deux mois suivants. Pendant les trois derniers mois, les teneurs en carbone de l'horizon B restent stables, à des niveaux qui comme nous l'avons vu sont accrus par rapport aux témoins (F_1) d' 1/40ème du carbone apporté par la paille dans l'horizon A.

En résumé, le lessivage hebdomadaire des modèles provoque un enrichissement net en carbone de l'horizon B des modèles, qui est précoce, proportionnel au carbone apporté par la paille dans l'horizon A, mais transitoire. Cependant en fin d'expérience, on observe encore un léger enrichissement en carbone de l'horizon B, qui est stabilisé à des niveaux proportionnels aux doses de paille de luzerne ajoutées dans l'horizon A. Le processus d' illuviation dans l'horizon B de matières

TABLEAU 4

Modèle A+B CARBONE (mg C par g sol) restant dans l' Horizon B
 ----- en fonction du Carbone de la paille ajoutée dans l' Horizon A
 $Chb \text{ (restant)} = Copl + \text{Gamma} * Cpl$

+++++

Durées d'incubation (jours)	C dans hor. B sans apport de paille (ChBf1)	- Copl -	- Gamma -	Coefficient de détermination (R ²)	Obs.
0	Co (3,75)				
1	4,03	4,05	0,0297	0,85 (sans F4)	
15	4,18	4,28	0,0407	0,86	
30	3,99	3,87	0,0529	0,92	
90	3,82	3,75	0,0213	0,89	
180	3,77	3,76	0,0264	0,99	

+++++

Cpl = 0 pour F1, 9,76 pour F2, 19,12 pour F3, et 27,91 mgC/g pour F4

Modèle A+B AZOTE (mg N par g sol) restant dans l' Horizon B
 ----- en fonction de l'azote de la paille ajoutée dans l' Horizon A
 $Nhb \text{ (restant)} = Nopl + \text{delta} * Npl$

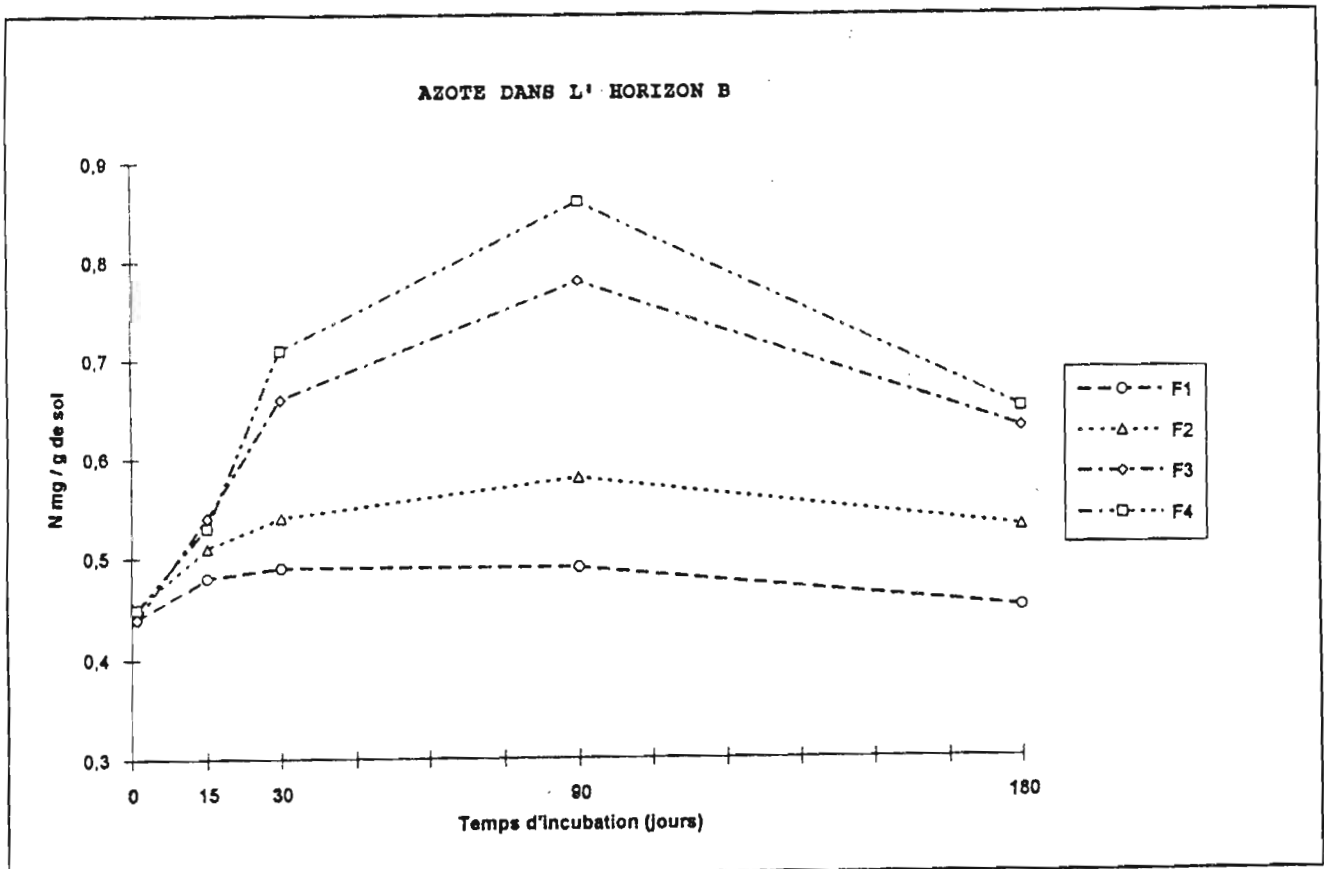
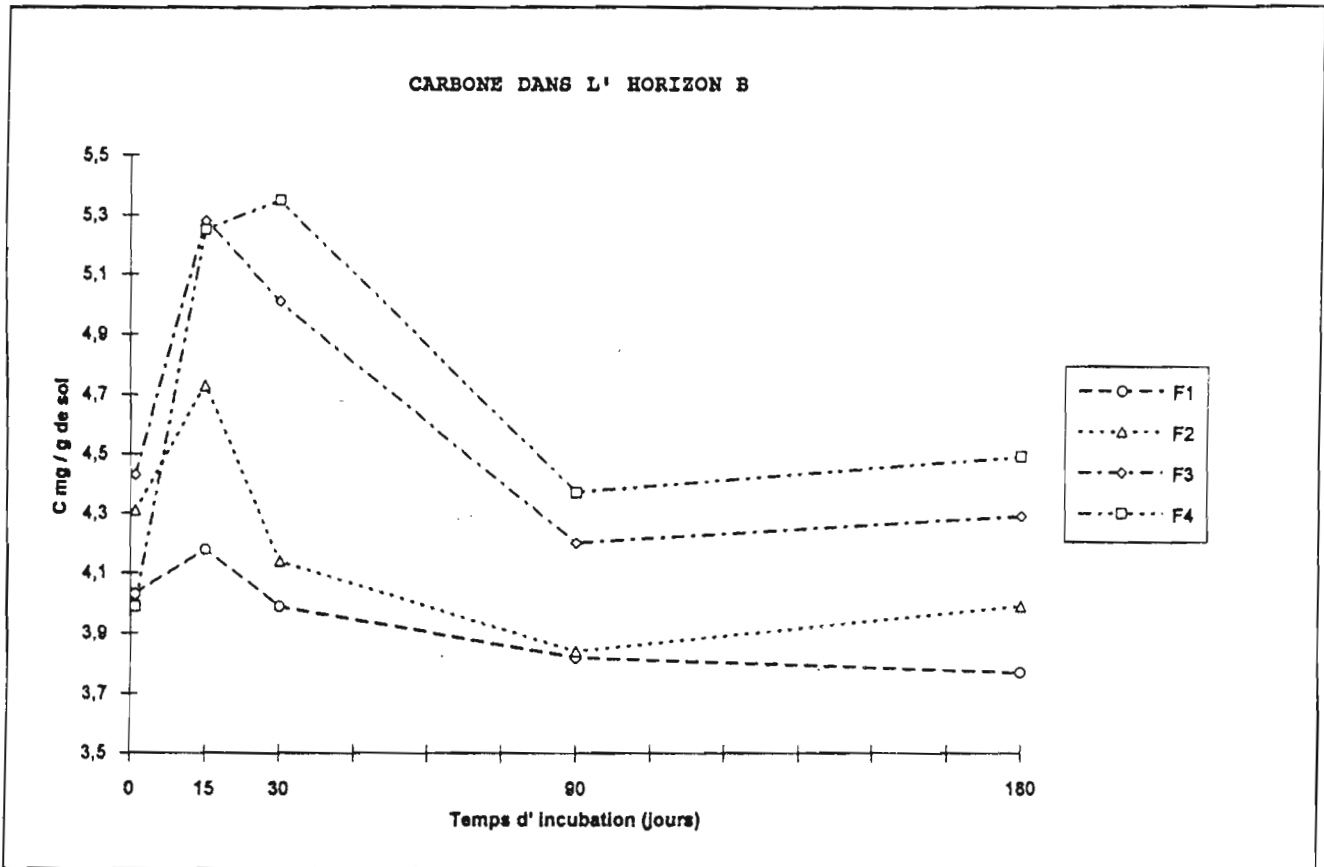
+++++

Durées d'incubation (jours)	N dans hor. B sans apport de paille (NfBf1)	- Nopl -	- delta -	Coefficient de détermination (R ²)	Obs.
0	No (0,49)				
1	0,44	0,442	0,004	N.S.	
15	0,48	0,484	0,027	N.S.	
30	0,49	0,477	0,120	0,94	
90	0,49	0,476	0,200	0,90	
180	0,45	0,456	0,108	0,87	

+++++

Npl = 0 pour F1, 0,69 pour F2, 1,35 pour F3, 1,97 mgN/g pour F4

FIGURE 4



organiques provenant de la paille de luzerne apportée dans l'horizon A est donc modeste, mais significatif.

1.3. EVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE DANS LES MODELES

Avant de faire le bilan de l' azote dans l' ensemble des modèles, nous étudierons l' évolution des teneurs en azote dans les horizons A et B des modèles (fig.5 et annexe 2).

1.3.1. EVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE DANS L' HORIZON A

Comme pour le carbone, les teneurs en azote de l'horizon A des modèles sont fonction à la fois des doses de paille de luzerne ajoutées, et du temps d'incubation.

Influence des doses de paille ajoutées sur les teneurs en azote:

Pour chaque durée d'incubation, on constate (tabl. 5) que les teneurs en azote restant dans l' horizon A sont proportionnelles aux quantités d' azote provenant de la paille de luzerne ajoutée :

$$(5) \quad (N \text{ restant}) = c + d \times (N_{FL} \text{ ajouté})$$

Les relations linéaires entre l'azote restant à l'instant t et l'azote ajouté initialement sont plus étroites que pour le carbone. Les pentes "d" des droites de régression décroissent aussi avec le temps d'incubation (cf. N.B. tabl.5). Si on ne tient pas compte de la droite de régression au premier jour, on constate que "d" s'ajuste parfaitement à une exponentielle décroissante en fonction de la durée d'incubation:

$$d = \beta \times e^{-K_{NP} \times t} = 0,997 \times e^{-0,00473 \times t} \quad R^2=0,998$$

Le paramètre β , très proche de 1, montre que tout l'azote de la paille de luzerne apportée est potentiellement décomposable selon une cinétique du premier ordre. La constante K_{NP} de disparition journalière (minéralisation, volatilisation et lessivage) de l'azote provenant de la paille de luzerne ajoutée est sensiblement plus faible que la constante K_{CP} de disparition du carbone de la paille de luzerne.

Les valeurs de "c" des équations (5) constituent des estimations des teneurs en azote de l'horizon A des modèles, au temps t, pour un apport de paille nul. Elles sont très proches des teneurs moyennes en azote mesurées dans le modèle (F1) sans apport de paille.

Comme pour les teneurs en carbone, on peut estimer un indice d'incitation "PR_N" ou "priming ratio" qui correspond au quotient de l'azote provenant du sol, perdu lorsque l'on ajoute de la paille, divisé par l' azote provenant du sol, perdu sans apport de paille:

$PR_N = (N_0 - c) / (N_0 - N_{F1})$. On constate que ce rapport est de l'ordre de: 1,2 pendant les quinze premiers jours, puis devient ensuite égal à 1. L'apport d'azote par la paille de luzerne entraînerait donc une légère accélération de la décomposition ou du lessivage des constituants azotés préexistant dans le sol de l'horizon A. Ensuite les pertes d'azote provenant du sol sont à peu près du même ordre de grandeur avec ou sans apport de paille.

Si on ne tient pas compte des mesures faites au premier jour, on constate (tabl.5) que le paramètre "c" s'ajuste à une fonction exponentielle décroissante du temps d'incubation:

$$c = N_1 \times e^{-K_{NS} \times t} = 2,096 \times e^{-0,000694 \times t} \quad R^2=0,896$$

La constante journalière de décomposition ou disparition de l'azote provenant du sol $K_{NS}=0,000694 \text{ j}^{-1}$ est du même ordre de grandeur que pour le carbone provenant du sol.

AZOTE DANS L' HORIZON A

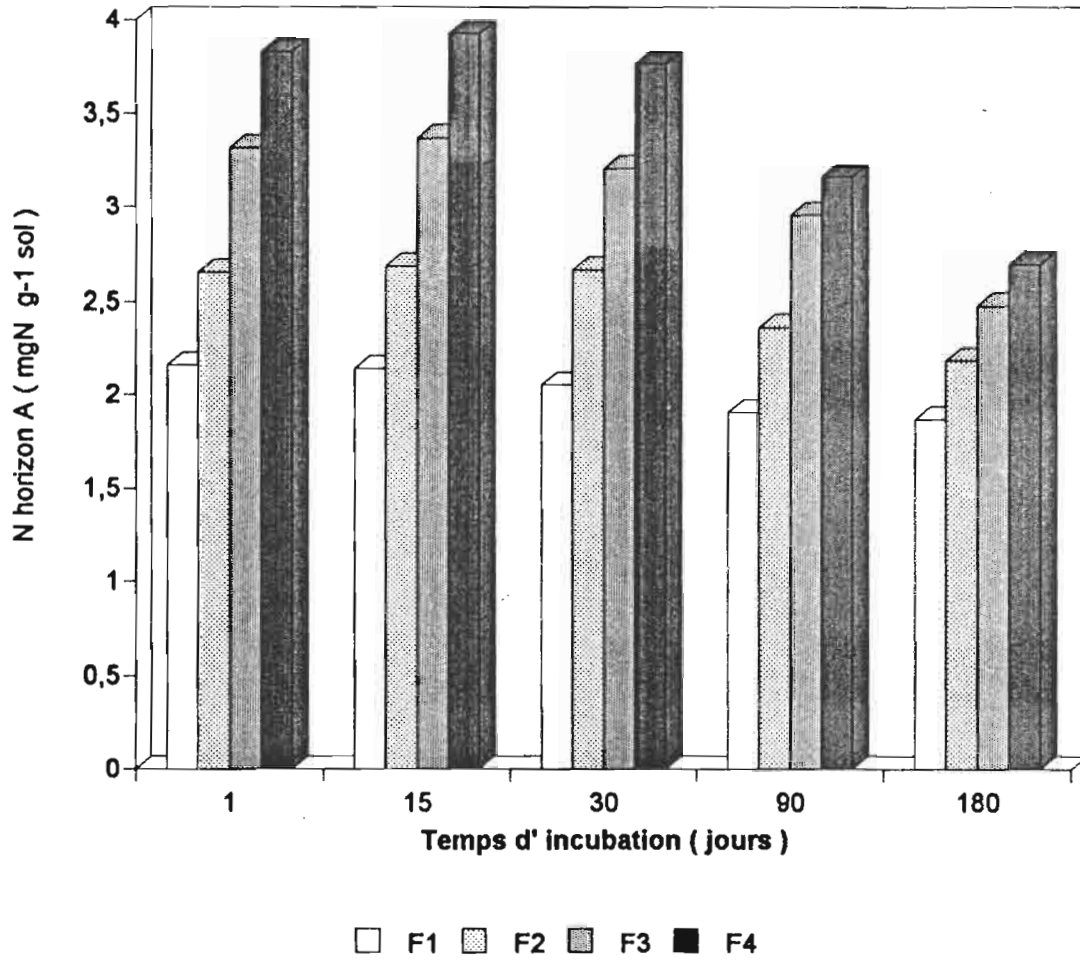


FIGURE 5

TABLEAU 5

Modèle A+B
 =====
 AZOTE (mg N par g sol) restant dans l' horizon A
 en fonction de l'azote ajouté dans l'apport de paille
 (N restant) = c + d *(N ajouté)

+++++

Durées d'incubation (jours)	N(f) moyennes sans apport de paille (Nf)	- c -	- d -	Coefficient de détermination (R ²)	Indice d'incitation (PRn)
0	(No = 2,31)	(2,31)	(1)	(théorique)	
1	2,16	2,12	0,859	0,985	1,27
15	2,14	2,10	0,919	0,990	1,24
30	2,05	2,05	0,861	0,999	1,00
90	1,90	1,92	0,667	0,956	1,00
180	1,86	1,87	0,452	0,960	1,00

Modèle A sans B
 =====

180	1,78	1,78	0,488	0,986	1,00
-----	------	------	-------	-------	------

+++++

No = teneur en azote du sol placé dans l'horizon A du modèle
 La pente d des droites de régression décroît en fonction du temps t d'incubation
 (sauf pour t=1) $d = 0,997 * \exp(-0,00473*t)$ R² = 0,998
 Le paramètre c décroît en fonction du temps t d'incubation
 (sauf pour t=1) $c = 2,096 * \exp(-0,000694*t)$ R² = 0,896
 PRn ; Indice d'incitation (Priming Ratio) = (No-c) / (No-Nf)

Il reste à exprimer "c" en fonction de la teneur initiale en azote du sol N_1 pour $t = 0$. Comme pour le carbone, nous appellerons I_N la différence entre N_1 et la teneur initiale en azote du sol placé dans l'horizon A des modèles: N_0 . Ce paramètre I_N correspond au stock d'azote du sol qui est lixivé au cours du ressuyage, ou qui se décompose au cours des premiers jours suite à l'humectation ("flush") et à l'effet d'incitation dû à la paille de luzerne enfouie. $I_N = 2,31 - 2,10 = 0,21$ est en valeur relative plus important que I_C .

En remplaçant dans l'équation (5), "c" et "d" par leurs évaluations en fonction du temps d'incubation, on obtient une formule d'estimation de l'azote dans l'horizon A du modèle de la forme suivante:

$$(6) \quad N_t = (N_0 - I_N) \times e^{-K_{NS} \times t} + \beta \times N_{p1} \times e^{-K_{NP} \times t}$$

dans laquelle:

N_t = la teneur en azote de l'horizon A du modèle à l'instant t

$I_N = 0,21$ est le stock d'azote du sol perdu au cours du ressuyage ou minéralisé ("flush") et lixivié au cours des premiers jours, suite à l'humectation et à l'effet d'incitation dû à la paille de luzerne enfouie.

$N_0 = 2,31$ est la teneur en azote du sol placé dans l'horizon A pour $t = 0$

$K_{NS} = 0,000694 \text{ j}^{-1}$ constante de disparition journalière de l'azote de l'horizon A provenant du sol

$\beta = 0,997$ fraction de l'azote contenu dans la paille de luzerne ajoutée, qui est potentiellement minéralisable

$K_{NP} = 0,00473 \text{ j}^{-1}$ constante de disparition journalière de l'azote provenant de la paille de luzerne ajoutée dans l'horizon A

N_{p1} = la teneur en azote de l'horizon A, qui provient de la paille de luzerne ajoutée à l'instant zéro, soit:

$N_{p1} = 0$ pour F_1 , $0,69$ pour F_2 , $1,35$ pour F_3 , et $1,97 \text{ mg/g}$ de sol pour F_4

t = durée d'incubation en jours.

En résumé, le stock I_N d'azote provenant du sol de l'horizon A qui est perdu en début d'incubation ("flush") est relativement important. A chaque instant t, la teneur en azote de l'horizon A des modèles peut être ensuite estimée comme la somme de l'azote restant qui provient du sol et de celui qui provient de la paille de luzerne ajoutée. La fraction β de l'azote de la paille qui est potentiellement décomposable est égale à un. Le demi-temps moyen de résidence de l'azote du sol placé dans l'horizon A ($T_{1/2} = \ln 2 / K_{NS} = 998 \text{ j}$) est identique à celui du carbone de ce sol. Par contre, la constante de décomposition, volatilisation et/ou de lixiviation journalière de l'azote provenant de la paille de luzerne est inférieure de 50% à la constante de disparition journalière du carbone de la paille ($T_{1/2(NP)} = 146 \text{ j}$ et $T_{1/2(CP)} = 101 \text{ jours}$).

Cinétique d'évolution des teneurs en azote en fonction du temps

d'incubation

On constate que pour chacune des doses de paille de luzerne ajoutées, les teneurs en azote de l'horizon A des modèles décroissent suivant une cinétique du premier ordre en fonction de la durée d'incubation t (cf. tabl.6). Toutefois les coefficients de détermination sont meilleurs lorsque l'on ne tient pas compte des mesures au premier jour.

$$(7) \quad N_t = N_{OF} \times e^{-K_N \times t}$$

Les constantes de décomposition journalières "K_N" (minéralisation et pertes par volatilisation ou lixiviation) de l'azote organique provenant indistinctement du sol et de la paille ajoutée, augmentent d'environ 60% pour (F₂), 120% pour (F₃) et triple pour (F₄) par rapport au témoin (F₁). Les temps de demi-vie ou demi-temps moyen de résidence de l'ensemble des matières azotées passent de 870 jours pour le témoin (F₁) à respectivement 530, 380 et 300 jours pour les trois doses de paille ajoutées.

Pour chacune de ces doses de paille ajoutée, l'ordonnée N_{OF} pour t=0 est nettement inférieure aux teneurs initiales calculées (azote provenant du sol + azote provenant de la paille) dans l'horizon A des modèles. Ceci confirme l'existence d'un "flush" ou diminution rapide des teneurs en azote de l'horizon A. Cet azote labile est perdu par minéralisation et lixiviation au cours de l'humectation, du ressuyage et des premiers jours d'incubation.

Par ailleurs, on remarque que les teneurs initiales N_{OF} des modèles sont proportionnelles à l'azote qui provient de la paille de luzerne ajoutée N_{PFL}

$$N_{OF} = (N_0 - I_N) + \beta \times N_{PFL} = 2,093 + 0,9724 \times N_{PFL} \quad R^2 = 0,999$$

La fraction "β" de l'azote provenant de la paille de luzerne qui est potentiellement minéralisable est très proche de l'unité.

L'ajustement de la teneur en azote de l'horizon A à la teneur en azote initiale du sol N₀ confirme qu'il existe un stock d'azote labile éliminé initialement ("flush"), qui en valeur relative n'est pas négligeable (I_N = 2,31 - 2,09 = 0,22), puisqu'il représente un dixième de l'azote du sol.

Si on reporte cette estimation de N_{OF} dans l'équation (7), on obtient une formule d'estimation (7') qui diffère fondamentalement de (6) du fait que la constante journalière K_{N_{EP}} de décomposition et lessivage de l'azote contenu dans l'horizon A varie fortement en fonction de la dose de paille ajoutée (tabl.6).

$$(7') \quad N_t = (N_0 - I_N + \beta \times N_{PFL}) \times e^{-K_{N_{EP}} \times t}$$

Néanmoins, la médiocrité du coefficient de détermination de la régression (7) pour le traitement (F₁) jette un doute sur la représentativité de cette expression mathématique de la teneur en azote au temps t, pour les modèles avec un apport de paille de luzerne faible ou nul. Par contre, elle paraît valable pour les traitements (F₂), (F₃) et (F₄). Elle confirme en particulier l'estimation très voisine de l'unité du paramètre "β", fraction potentiellement minéralisable de l'azote provenant de la paille de luzerne ajoutée.

1.3.2. EVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE DANS L' HORIZON B

Le problème essentiel est d'estimer l'influence des doses de paille ajoutées dans l'horizon A sur la lixiviation et l'enrichissement en azote de l'horizon B des modèles au cours de la période expérimentale.

Influence des doses de paille ajoutées sur les teneurs en azote total

de l'horizon B:

Pour chacune des durées d'incubation, les teneurs en azote dans l'horizon B augmentent avec les doses de paille ajoutées dans l'horizon A (tabl.4):

TABLEAU 6

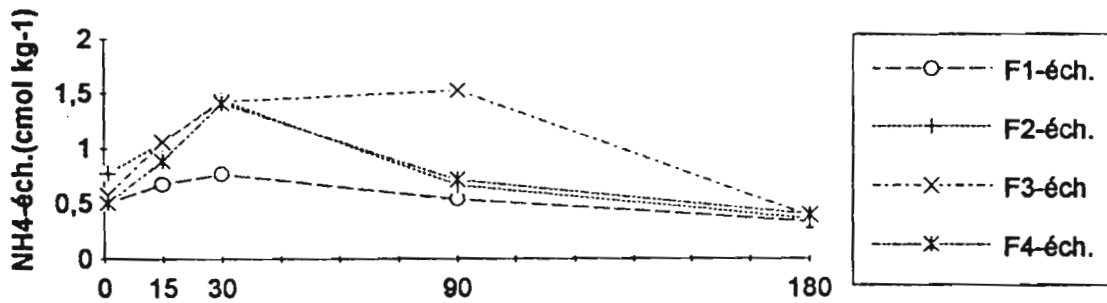
Modèle A+B		Cinétique d'évolution de l' Azote (mg N /g sci) dans l' horizon A des modèles				
-----		Nt = Nof * exp(-Kn * t) (t en jours)				
=====						
Fumures:	No teneurs	- Nof -	- Kn -	- T1/2 -	- R ² -	
Npl apporté	initiales	teneurs		LDG 2/-Kc	Coefficient	
par la paille	théoriques	initiales		Demi-vie	détermination	

F1	(0,00)	(2,31)	2,11	-0,00080	866	0,730
F2	(0,69)	(2,95)	2,73	-0,00132	527	0,957
F3	(1,35)	(3,55)	3,44	-0,00183	379	0,958
F4	(1,97)	(4,14)	4,00	-0,00230	301	0,960
=====						
N.B:		Nof = 2,093 + 0,972 * Npl			R ² =0,9987	

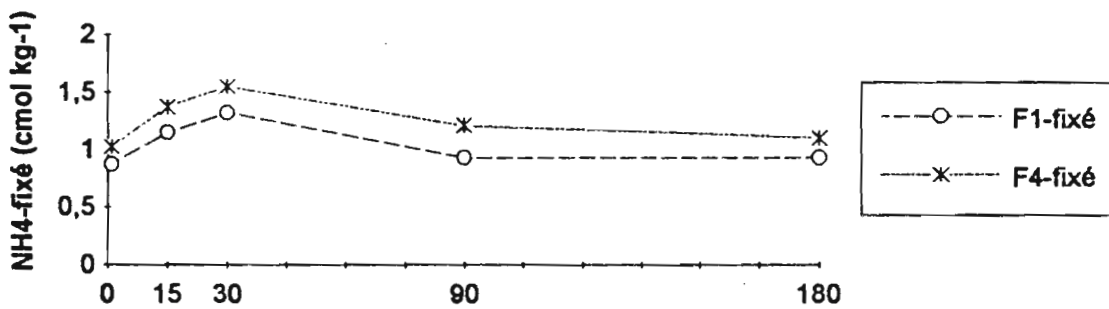
FIGURE 6

AMMONIUM ECHANGEABLE ET FIXE DANS LES HORIZONS A ET B

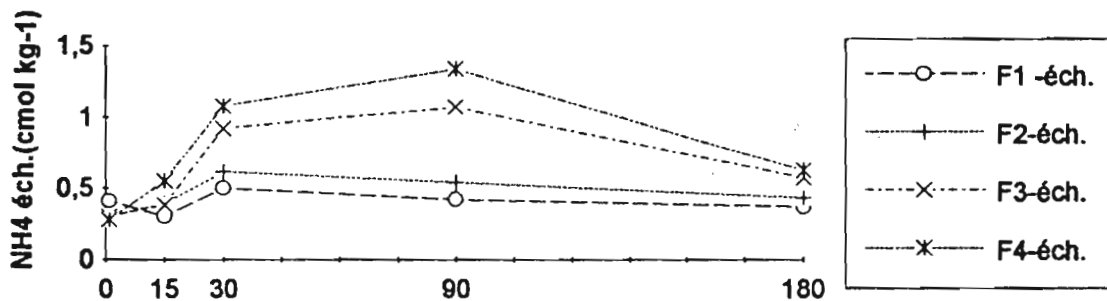
AMMONIUM ECHANGEABLE DANS L' HORIZON A



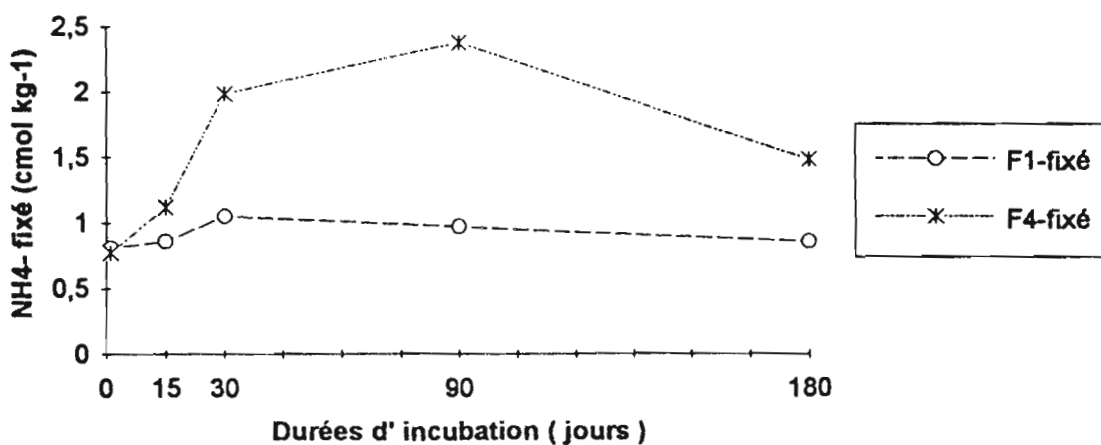
AMMONIUM FIXE DANS L' HORIZON A



AMMONIUM ECHANGEABLE DANS L' HORIZON B



AMMONIUM FIXE DANS L' HORIZON B



Durées d' incubation (jours)

$$(8) \quad N_{NB} = N_{NB(\text{Op1})} + \delta \times N_{P1}$$

Toutefois pendant les 15 premiers jours, l'augmentation est très faible, et les régressions non-significatives. Nous verrons même que l'ammonium échangeable présent le premier jour dans l'horizon B, décroît lorsque les doses de paille augmentent.

Les pentes " δ " des droites de régression linéaires augmentent ensuite et passent par un maximum au bout de trois mois, puis décroissent pendant les trois mois suivants. La valeur maximum de " δ " est de l'ordre de 0,2 c'est à dire qu'au 90ème jour, les teneurs en azote dans l'horizon B augmentent d'environ un cinquième de l'azote provenant de la paille apportée dans l'horizon A.

L'influence des doses de paille ajoutées sur les teneurs en ammonium échangeable et en ammonium fixé dans l'horizon B devient très nette à partir du quinzième jour, et l'augmentation de $N-NH_4$ devient maximum au bout de trois mois (fig.6).

Les teneurs estimées $N_{NB(\text{Op1})}$ sans apport de paille sont très proches des teneurs mesurées pour le traitement F_1 . Elles s'accroissent légèrement pendant le premier mois, puis décroissent légèrement en fin d'incubation.

Cinétique d'évolution des teneurs en azote dans l'horizon B

Pour chacune des doses de paille ajoutées, les teneurs en azote dans l'horizon B des modèles augmentent plus lentement que les teneurs en carbone pendant les quinze premiers jours d'incubation (fig.4); mais cet enrichissement net en azote de l'horizon B se poursuit rapidement jusqu'à la fin du premier mois, et plus lentement au cours des 2ème et 3ème mois. Pendant les trois mois suivants, les teneurs en azote de l'horizon B des modèles décroissent lentement.

Les cinétiques d'évolution des teneurs en azote dans l'horizon B des modèles diffèrent donc fondamentalement de la cinétique du carbone dans cet horizon (fig.3). Le démarrage de l'accumulation nette d'azote est plus lent, mais l'enrichissement est plus prolongé que pour le carbone; ce qui fait que les maxima d'accumulation d'azote dans l'horizon B, qui interviennent vers la fin du troisième mois correspondent à l'accumulation minimale de carbone. Les dynamiques de l'azote et du carbone dans l'horizon B des modèles seraient donc globalement différentes et probablement indépendantes.

Nous verrons dans la deuxième partie de cette publication, que l'accumulation nette d'azote dans l'horizon B des modèles F_4 est due en partie à un fort enrichissement en azote minéral (ammonium échangeable et fixé) entre le premier et le troisième mois (fig.6). De plus la fixation de l'ammonium dans l'horizon B des modèles (annexe III) doit retarder son élution par rapport à celle de l'ammonium échangeable.

En résumé, l'enrichissement net en azote de l'horizon B des modèles est plus tardif, plus prolongée et plus marqué que pour le carbone; mais la durée limitée des expériences ne permet pas de juger à partir de quelle durées d'incubation, ni à quel niveau d'enrichissement, il y a stabilisation de l'illuviation de l'azote dans l'horizon B, pour chacune des doses de paille de luzerne ajoutée dans l'horizon A.

1.4. EVOLUTION DE C ET DE N DANS LES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES

=====

Le dosage du carbone et de l'azote dans les différentes fractions granulométriques séparées par tamisage humide permet d'identifier les compartiments de l'horizon A des modèles, qui sont influencés par l'incorporation de différentes doses de pailles de luzerne calibrée (0,2 à 2mm), et par la durée d'incubation (fig. 7 et annexe 4).

1.4.1 INFLUENCE DES DOSES DE PAILLE AJOUTEES SUR LE CARBONE CONTENU DANS LES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES

Si l'on compare les quantités de carbone (mg C / g de sol) contenues dans les fractions granulométriques pour chacune des durées d'incubation, on constate (tabl.7) que l'influence des doses de paille ajoutées est surtout marquée pour la fraction (SG) composée de particules de taille comprise entre 0,2mm et 2mm. Au cours des premiers jours, les quantités de carbone contenues dans cette fraction C_{SG} sont approximativement proportionnelles aux doses de carbone ajoutées dans l'horizon A du modèle.

$$(9) \quad (C_{SG} \text{ restant}) = C_{SG0} + \alpha \times (C_{PL} \text{ ajouté})$$

La pente " α " de la droite de régression au premier jour est nettement plus faible pour C_{SG} que pour le carbone total restant dans l'horizon A des modèles. Au cours du premier mois " α " reste légèrement inférieur à celui trouvé pour le sol total. Ceci indique que la fragmentation des débris de paille, précède leur décomposition et la volatilisation ou le lessivage des produits de décomposition.

Les teneurs C_{SG} restant à l'instant t, augmentent plus faiblement entre le témoin F_1 et la dose la plus faible F_2 , qu'entre F_2 et F_3 , ou F_3 et F_4 (fig.8).

Les valeurs de " C_{SG0} " qui correspondent à l'estimation de la teneur en carbone restant dans la fraction (SG) à l'instant t pour un apport de paille nul, sont nettement inférieures aux teneurs C_{SG} mesurées pour les modèles F_1 , sans apport de paille. Ceci paraît indiquer que la fraction C_{SG} provenant du sol se décompose un peu plus vite dans les modèles enrichis en paille de luzerne. Il existe donc une interaction $I_{C_{SG}} = C_{SG} F_1 - C_{SG0}$, qui ne paraît pas proportionnelle aux doses de paille ajoutées. Cette interaction est plus importante que celle observée pour l'ensemble du sol. Elle montre que l'apport de paille de luzerne accélère particulièrement la décomposition des matières organiques et débris végétaux provenant du sol, qui constituent l'essentiel du compartiment C_{SG} de l'horizon A, du mull forestier. Cette interaction qui est aussi relativement importante par rapport au volume de ce compartiment C_{SG} du sol. Elle décroît au cours de l'incubation spécialement pendant le premier mois, mais reste significative pendant les trois premiers mois.

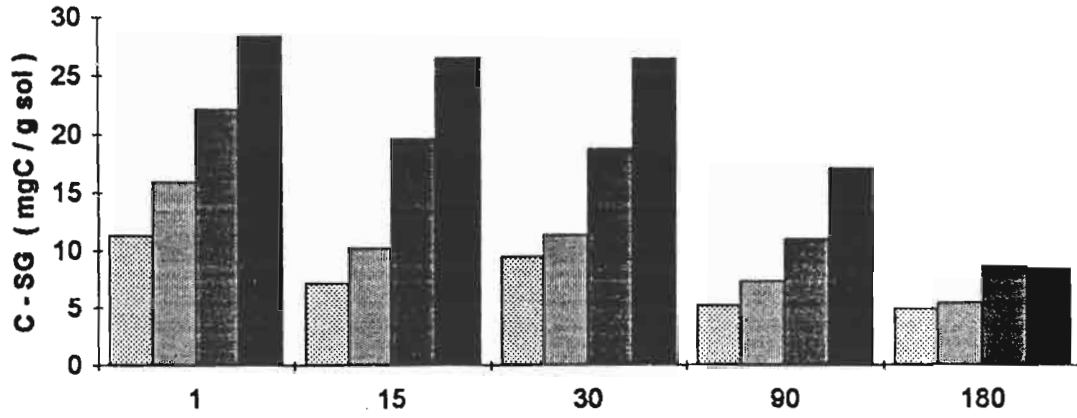
Les variations, en fonction des doses de paille ajoutées, des teneurs en carbone restant dans la fraction "SF" (50 à 200 μ m) de l'horizon A des modèles sont par contre très faibles. Les composés organiques provenant de la fragmentation de la paille calibrée et des produits de sa décomposition n'enrichissent pas significativement cette fraction SF, si ce n'est légèrement au début et en fin d'expérience.

L'accroissement des teneurs en carbone de la fraction fine "AL" (inférieure à 50 μ m) en fonction des doses de paille apportées est nette

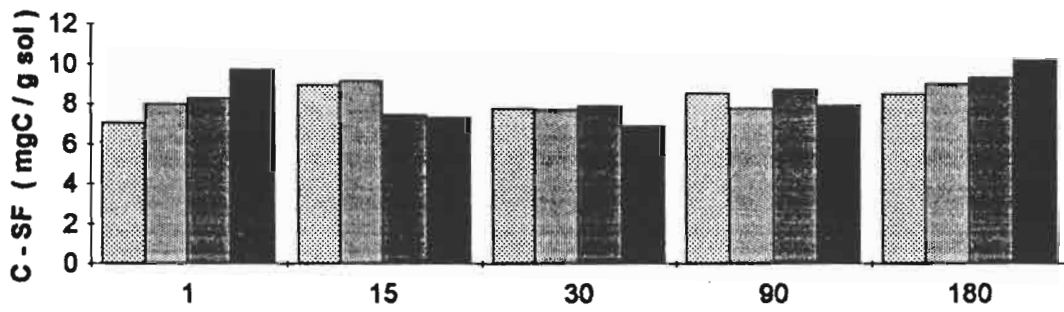
FIGURE 7

CARBONE DANS LES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES (HORIZON A)

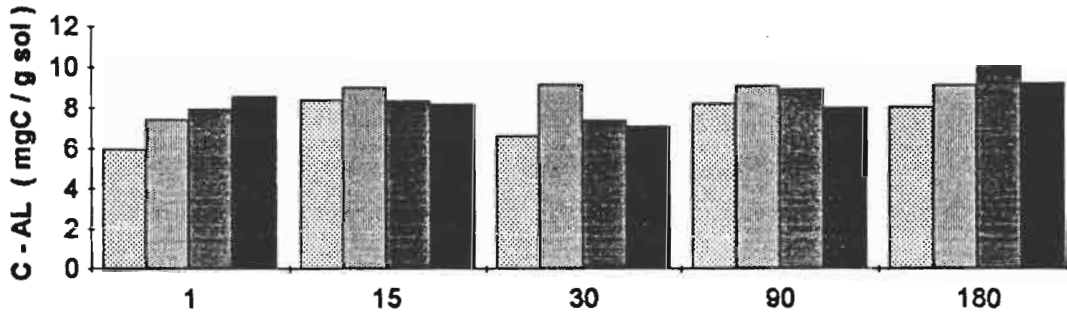
Carbone dans la fraction S.G. (0,2 à 2mm)



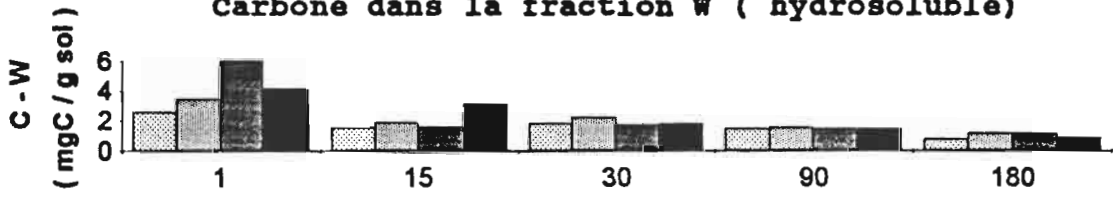
Carbone dans la fraction S.F. (0,05 à 0,2mm)



Carbone dans la fraction A.L. (inf.à 0,05mm)



Carbone dans la fraction W (hydrosoluble)



Durées d' incubation (jours)

□ F1 □ F2 ■ F3 ■ F4

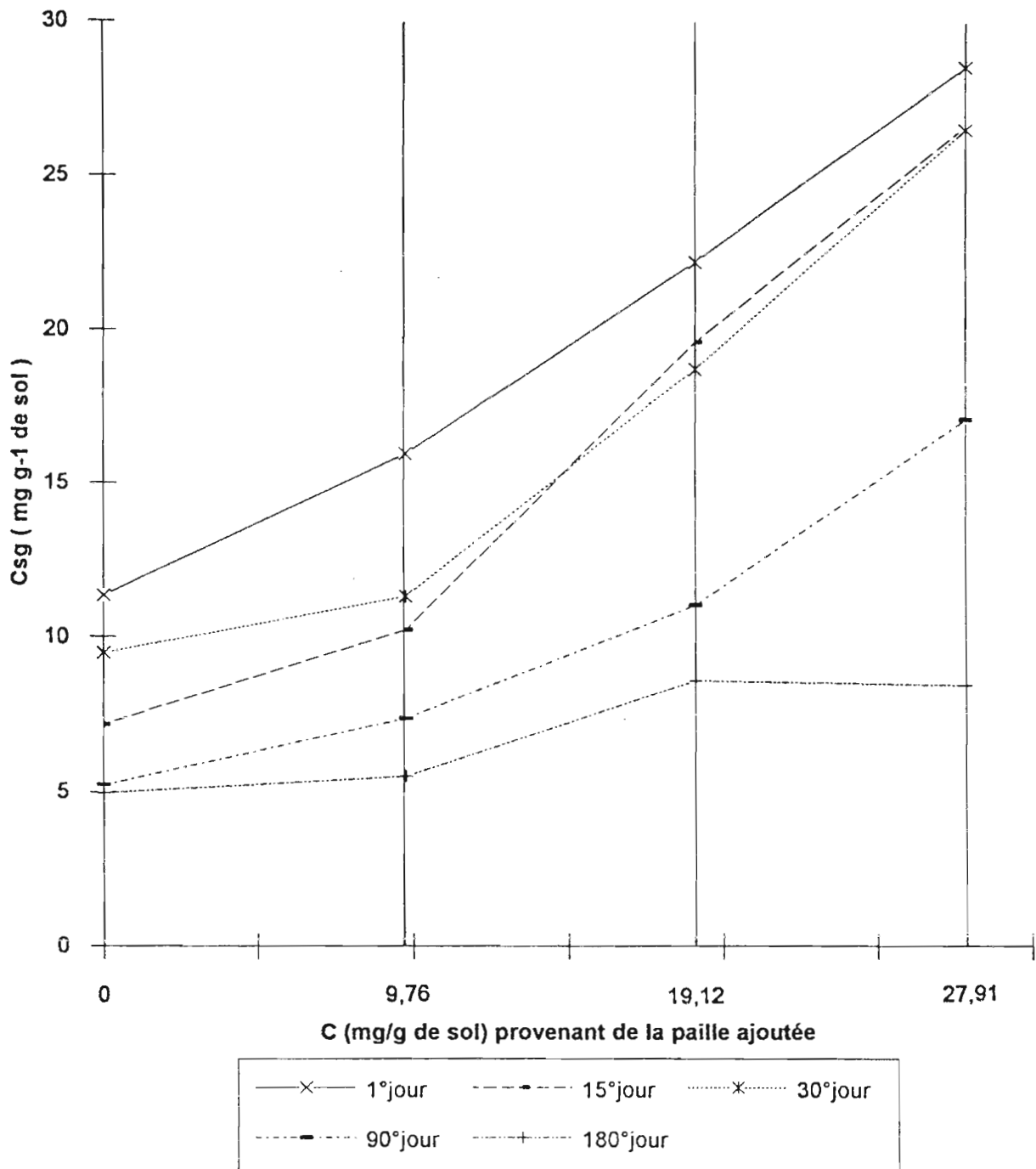
TABLEAU 7

Modèle A+B Effets du Carbone de la paille ajouté (Cpl) sur Csg
 ----- Carbone (mg C / g sol) dans la Fraction Sableuse Grossière
 (horizon A) Csg restant = Csgo + alpha * Cpl ajouté

Temps (jours) d'incubation	Csg pour Fl mesures sans apport de paille	Csgo estimations pour Cpl=0	alpha paramètre de transformation de Cpl ajouté	R ² Coefficient de détermination
(0)	(7,77)		(1)	(théorique)
1	11,34	10,71	0,617	0,991
15	7,17	5,63	0,722	0,962
30	9,47	7,64	0,622	0,934
90	5,21	4,22	0,419	0,943
180	4,95	4,80	0,146	0,841

FIGURE 8

Effet de l'apport de paille de luzerne sur la
quantité de Carbone dans la fraction SG (>200 μ m)
dans l'horizon A des modèles (A+B)



au premier jour. Par la suite l'augmentation de C_{AL} est sensiblement du même ordre de grandeur pour F_1 et F_2 , mais on observe une dispersion de C_{AL} pour F_3 et F_4 .

Comme on pouvait le prévoir, les teneurs en carbone de la fraction "W" (hydrosoluble) n'augmentent en fonction des doses de paille ajoutées que pendant les premiers jours. A partir du trentième jour, les composés hydrosolubles provenant de la décomposition de la paille sont lixiviés, et les valeurs de C_w restant deviennent très analogues quelles que soient les doses de paille ajoutées; mais comme nous le verrons, elles décroissent sensiblement en fonction du temps d'incubation.

Le dosage des sucres réducteurs après hydrolyse acide de la fraction "W" indique qu' environ un cinquième du carbone contenu dans cette fraction hydrosoluble est constitué par des polysaccharides (tabl.8). Ces chiffres sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus par JENKINSON (1968) sur d'autres types de sols. Toutefois l'influence des doses de paille ajoutées sur la teneur en polysaccharides de la fraction "W" est très marquée le premier jour, mais disparaît ensuite. Les polysaccharides hydrosolubles provenant de la paille sont donc lixiviés ou décomposés au cours des quinze premiers jours.

1.4.2. INFLUENCE DES DOSES DE PAILLE AJOUTÉES SUR L' AZOTE CONTENU DANS LES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES. (annexe 5)

Les quantités d'azote restant dans les fractions "SG" pour chaque durée d'incubation sont proportionnelles à N_{PL} , azote apporté par la paille de luzerne:

$$(10) \quad (N_{SG} \text{ restant}) = N_{SG0} + \beta \times (N_{PL} \text{ ajouté})$$

Comme pour les teneurs en carbone, le paramètre " β " qui est la fraction de l'azote de la paille de luzerne, restant dans la fraction (SG) de l'horizon A des modèles est supérieur à 0,6 % pendant le premier mois, sauf pour le premier jour (tabl.9). Il décroît très fortement ensuite et devient beaucoup plus faible que pour l'azote total au bout de six mois d'incubation. Ceci confirme que la fragmentation des résidus végétaux précède la décomposition et le lessivage des composés azotés apportés par la paille de luzerne.

Les estimations par ces droites de régression de la teneur en azote de la fraction "SG" pour un apport de paille nul, sont nettement plus faibles que les teneurs N_{SG} pour le traitement F_1 . Ceci paraît dû au fait que N_{SG} augmente plus faiblement entre F_1 et F_2 qu'entre F_2 et F_3 , ou F_3 et F_4 . Il existe donc une interaction $I_{N_{SG} - N_{SG} F_1 - N_{SG0}}$ ou effet de l'apport de paille, qui accélère la décomposition des composés azotés provenant du sol contenus dans ce compartiment N_{SG0} de l'horizon A des modèles.

L'ajustement des régressions sur les modèles F_2 , F_3 et F_4 confirme l'importance de cette interaction (tabl.9) qui est maximum à la fin du premier mois, et s'annule en fin d'expérience. Cette interaction est en valeur relative, très nettement supérieure à celle observée pour N total.

Les variations, en fonction des doses de paille ajoutées, de l'azote contenu dans les fractions "SF" et "AL" sont faibles et différent légèrement suivant la durée d'incubation.

TABLEAU 9

Modèle A+B Effets de Npl (azote apporté par la paille) sur Nsg
 ----- (Azote en mg / g sol) dans la fraction Sableuse Grossière
 (horizon A) Nsg restant = Nsgo + bêta * Npl ajouté

Temps (jours) d'incubation	Nsg pour F1 sans apport de paille	Nsgo estimation pour Npl=0	bêta paramètre de transformation de Npl ajouté	R ² Coefficient de détermination
1	0,77	0,71	0,42	0,965
15	0,37	0,27	0,70	0,950
30	0,62	0,45	0,67	0,907
90	0,30	0,21	0,45	0,938
180	0,27	0,28	0,14	0,960

Modèle A+B Effets de Npl (azote apporté par la paille) sur Nsg
 ----- (Azote en mg / g sol) dans la fraction Sableuse Grossière
 (horizon A) Nsg restant = Nsgo + bêta * Npl ajouté

Temps (jours) d'incubation	Nsg pour F1 sans apport de paille	Nsgo estimation pour Npl=0	bêta paramètre de transformation de Npl ajouté	R ² Coefficient de détermination
1	0,77	0,560	0,511	0,998
15	0,37	0,044	0,834	0,964
30	0,62	0,050	0,916	0,999
90	0,30	-0,006	0,587	0,997
180	0,27	0,314	0,115	0,901

 N.B. Régressions calculées pour les doses F2, F3 et F4.

Les teneurs en azote de la fraction "W" (hydrosoluble) augmentent le premier jour en fonction des doses de paille ajoutées. Par la suite, N_w est du même ordre de grandeur pour les différentes doses de paille ajoutées. Cependant l'azote hydrosoluble restant dans l'horizon A des modèles décroît en général avec le temps d'incubation.

1.4.3. EVOLUTION DU CARBONE CONTENU DANS LES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES EN FONCTION DE LA DUREE D'INCUBATION.

Pour chacune des doses de paille de luzerne ajoutées, on constate (tabl.10) que les quantités de carbone contenues dans les fractions granulométriques "SG" de l'horizon A des modèles décroissent en fonction de la durée d'incubation suivant une cinétique du premier ordre de la forme :

$$(11) \quad C_{SG} \text{ restant} = C_{SG0} \times e^{-K_{C_{SG}} \times t}$$

La constante de décomposition journalière " $K_{C_{SG}}$ " (minéralisation et pertes par volatilisation ou lixiviation) du carbone organique contenue dans la fraction (SG) est quatre fois plus élevée que pour l'ensemble des matières organiques contenues dans l'horizon A des modèles (tabl.3). D'autre part, " $K_{C_{SG}}$ " augmente nettement moins que K_C en fonction des doses de paille ajoutées. Par conséquent, si pour F_1 , c'est à dire sans apport de paille, le demi-temps moyen de résidence de C_{SG} est quatre fois plus faible que pour l'ensemble des matières organiques de l'horizon A; pour la dose de paille maximum (F_4), le demi-temps moyen de résidence: $T_{1/2}$ de C_{SG} est égal à environ la moitié de $T_{1/2}$ du carbone total de l'horizon A du modèle. Les matières organiques contenues dans la fraction (SG) sont donc manifestement constituées par deux compartiments, dont les caractéristiques dynamiques diffèrent fortement suivant leur origine (sol ou paille).

Les variations des teneurs initiales C_{SG0} estimées par ces régressions non linéaires pour $t=0$ sont proportionnelles à C_{PL} entre F_2 , F_3 et F_4 et correspondent à 95 % de la variation du carbone ajoutée sous forme de paille de luzerne calibrée. Par contre, la variation apparente de C_{SG0} entre F_1 et F_2 correspondrait seulement à 40 % du carbone de la dose (F_2) de paille de luzerne calibrée, qui a été ajoutée. Ceci paraît confirmer l'existence d'une interaction $I_{C_{SG}}$ qui n'augmente pas en fonction des doses de paille apportées.

La relation entre C_{SG0} et C_{PL} peut être exprimée pour l'ensemble des doses de paille apportée par une expression polynomiale du deuxième degré:

$$C_{SG0} = 9,27 + 0,258 \times C_{PL} + 0,0179 C_{PL}^2$$

On voit que $C_{SG0} = 9,27$ pour $C_{PL} = 0$, or la teneur en carbone de la fraction (SG) du sol placé dans l'horizon A des modèles est seulement de 7,77 mgC/g sol. L'humectation, l'incubation à 28°C, puis le séchage à 60°C paraissent augmenter l'importance de la fraction grossièrement agrégée et par voie de conséquence accroître l'importance de C_{SG0} . Ce processus paraît confirmé par la teneur en carbone un peu plus élevée de la fraction (SG) pour le modèle F_1 (sans apport de paille), au premier jour: $C_{SG1} = 11,34$.

Les teneurs en carbone des fractions hydrosolubles "W" décroissent également en fonction de la durée d'incubation (tabl.10), avec une constante journalière de décomposition K_{C_w} légèrement supérieure à $K_{C_{SG}}$. Toutefois les ajustements à une fonction exponentielle sont médiocres et il est manifeste qu'après une décroissance rapide pendant une durée d'incubation inférieure à 15 jours, C_w décroît ensuite faiblement en

TABLEAU 10

Modèle A+B Cinétique d'évolution de la fraction C_{sg}
 ----- (mg C /g sol dans la fraction > 0,2mm)
 (Horizon A) (C_{sg} restant) = C_{sgo} * exp (-K_{csg} * t)

FUMURE ; (Cpl apporté)	C _{sgo}	K _{csg}	T 1/2 Demi-vie LOG(2)/-K _{csg}	R ² Coefficient de détermination
F1 (0)	9,40	-0,0041	167	0,70
F2 (9,76)	13,09	-0,0052	134	0,87
F3 (19,12)	21,19	-0,0054	128	0,95
F4 (27,91)	30,29	-0,0069	100	0,99

N.B: C_{sgo} = 9,27 + 0,258*(Cpl) + 0,0179*(Cpl)² R²=0,998

Modèle A+B Cinétique d'évolution de la fraction C_w
 ----- (mg C /g sol dans la fraction hydrosoluble)
 (Horizon A) (C_w restant) = C_{wo} * exp (-K_{cw} * t)

FUMURE	C _{wo}	K _{cw}	T 1/2 Demi-vie LOG(2)/-K _{cw}	R ² Coefficient de détermination
F1	2,16	-0,0054	127	0,85
F2	2,62	-0,0048	145	0,76
F3	2,81	-0,0057	121	0,43
F4	3,25	-0,0077	90	0,86

suivant une cinétique d'ordre zéro, c'est à dire grossièrement linéaire quelles que soient les doses de paille ajoutées:

$$C_w = 2,1 - 0,0062 \times t \quad \text{pour } 15 < t < 180 \text{ jours.}$$

De même, les polysaccharides contenus dans la fraction hydrosoluble "W" décroissent très rapidement au cours des premiers jours (tabl.8). A partir du quinzième jour, les teneurs en sucres réducteurs sont analogues quelles que soient les doses de paille apportées initialement, et l'on observe une décroissance à peu près linéaire des polysaccharides hydrosolubles en fonction de la durée d'incubation:

$$C_{\text{polyac.w}} = 0,37 - 0,00076 \times t \quad \text{pour } 15 < t < 180 \text{ jours.}$$

Les variations de C_{SF} en fonction du temps d'incubation sont très limitées.

Enfin pour chacune des doses de paille ajoutées, on constate que les teneurs en carbone des fractions (AL) augmentent sensiblement en début d'incubation, et se maintiennent à peu près au même niveau par la suite.

1.4.4. EVOLUTION DE L' AZOTE CONTENU DANS LES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES EN FONCTION DE LA DUREE D' INCUBATION.

Pour chacune des doses de paille de luzerne ajoutée, nous avons recherché les régressions exponentielles décroissantes de l'azote contenu dans la fraction (SG) en fonction de la durée d'incubation:

$$(12) \quad (N_{SG} \text{ restant}) = N_{SG0} + e^{-K_{NSG} \times t}$$

Les coefficients de détermination des régressions non linéaires sont très médiocres pour F_1 et F_2 ; ils sont meilleurs pour F_3 et F_4 (tabl.11).

On constate que la constante journalière K_{NSG} de décomposition de l'azote contenu dans la fraction macro-agrégée serait trois à quatre fois plus grande que pour l'azote total (tabl.6). Le temps moyen de demi-vie de l'azote contenu dans cette fraction (SG) passerait comme pour C_{SG} d'environ 150 jours pour (F_1) à 100 jours pour (F_4).

Les estimations des teneurs initiales en azote contenues dans cette fraction N_{SG0} sont parfaitement corrélées à l'azote apportée par la paille de luzerne N_{PL} pour les traitements F_2 , F_3 et F_4 (cf: N.B. du tabl.11). La fraction "β" de l'azote de la paille qui est contenue dans la fraction SG est supérieur à 90%. Par contre la variation apparente de N_{SG0} entre F_1 et F_2 est nettement plus faible. Les ajustements figurant sous le tableau 6 montrent que l'ordonnée de $N_{SG0} = 0,11$ pour $N_{PL} = 0$. Cette valeur de N_{SG0} est nettement plus faible que la teneur initiale en azote de cette fraction macro-agrégée pour le sol placé dans l'horizon A des modèles. Ceci confirme l'importance de l'effet d'incitation dû à la paille de luzerne ajoutée sur la décomposition de l'azote contenu dans cette fraction (SG) qui provient du sol.

La diminution en fonction du temps d'incubation des quantités d'azote restant dans la fraction hydrosoluble paraît générale (tabl.11), quelles que soient les doses de paille de luzerne ajoutées. Toutefois les ajustements de N_w à des fonctions exponentielles de t sont très médiocres.

TABLEAU 11

Modèle A+B Cinétique d'évolution de la fraction Nsg

 (mg N /g sol dans la fraction > 0,2mm)
 (Horizon A) (Nsg restant) = Nsgo * exp(-Knsq * t)

FUMURE :	Nsgo	Knsq	T 1/2	R^2
(Npl apporté)			Demi-vie	Coefficient de
			LOG(2)/-Knsq	détermination
F1 (0)	0,58	-0,0049	143	0,61
F2 (0,69)	0,73	-0,0042	164	0,72
F3 (1,35)	1,36	-0,0056	123	0,97
F4 (1,97)	1,91	-0,0066	104	0,91

 N.B. Nsgo = 0,106 + 0,92*Npl R^2=0,9994 pour F2,F3 et F4
 Nsgo = 0,115 + 0,280*Npl + 0,137*(Npl)^2 R^2=0,988 pour F1,F2,F3 et F4

Modèle A+B Cinétique d'évolution de la fraction Nw

 (mg N /g sol dans la fraction hydrosoluble)
 (Horizon A) (Nw restant) = Nwo * exp (-Knw * t)

FUMURE	Nwo	Knw	T 1/2	R^2
			Demi-vie	Coefficient de
			LOG(2)/-Knw	détermination
F1	0,33	-0,0076	91	0,85
F2	0,32	-0,0024	293	0,85
F3	0,38	-0,0041	169	0,46
F4	0,36	-0,0052	134	0,62

1.4.5. EVOLUTION DU RAPPORT C/N DES MATIERES ORGANIQUES CONTENUES DANS LES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES (cf.annexe 6)

L'évolution très analogue du carbone et de l'azote contenu dans les différentes fractions granulométriques parait en relation avec la faible différence du rapport C/N de la paille de luzerne calibrée ajoutée (C/N = 14,2), et des matières organiques du sol placé dans l'horizon A des modèles (C/N = 9,6).

Le rapport C/N de la fraction macro-agrégée (SG) est compris entre 15 et 18. Il n'apparait pas une évolution nette de ce rapport en fonction de la durée d'incubation. Par contre, le rapport C/N de cette fraction devient un peu plus faible pour les doses de paille apportées les plus fortes F₃ et F₄.

Le rapport C/N de la fraction (SF) reste compris entre 10 et 12. Celui de la fraction (AL) entre 8 et 10. Enfin le rapport C/N de la fraction (W) hydrosoluble est généralement compris entre 5 et 7.

En résumé: Les quantités de carbone et d'azote organique contenues dans les fractions (SF) et (AL) du sol placé dans l'horizon A des modèles sont apparemment peu influencées par les doses de paille calibrée qui ont été ajoutées, et par la durée d'incubation. Ceci confirme les résultats obtenus par (TIESSEN et STEWART 1983). Les rapports C/N de ces deux fractions restent du même ordre de grandeur, respectivement 11 et 9.

L'enrichissement en carbone et azote organique de la fraction hydrosoluble (W) n'est important qu'en début d'expérience. A partir du quinzième jour, les teneurs en matières organiques de (W) ne diffèrent pratiquement plus en fonction des doses de paille apportées. La vitesse de décomposition de C_w devient grossièrement constante. Le rapport C/N de cette fraction (W) reste en général inférieur ou égal à 7.

Les quantités de carbone et d'azote contenues dans la fraction (SG) de l'horizon A des modèles est évidemment directement fonction des doses de paille calibrée, qui ont été ajoutées. Toutefois, les fractions "α" et "β" du carbone et de l'azote apporté par la paille que nous avons retrouvéé dans la fraction (SG) sont supérieurs à 0,6 pendant le premier mois; elles décroissent ensuite et ne sont plus que de 0,15 au bout de six mois d'incubation. Les vitesses de décomposition du carbone et de l'azote contenu dans cette fraction macro-agrégée sont nettement plus élevées que pour l'ensemble des matières organiques de l'horizon A des modèles. On en déduit que la fragmentation des débris végétaux précède leur décomposition.

Il existe manifestement un effet d'incitation ou "priming ratio" de la paille de luzerne apportée sur la décomposition du compartiment organique contenu dans la fraction grossière, qui provient de l'horizon A₁ du sol brun forestier. L'apport de paille parait lever le facteur limitant qui freine la fragmentation des débris végétaux et la décomposition des matières organiques contenues dans la fraction macro-agrégée de ce mull forestier.

Le rapport C/N des matières organiques contenues dans la fraction (SG), est compris entre 15 et 18. Il devient un peu plus faible pour les doses de paille de luzerne les plus fortes. Cependant, il n'est pas certain que ce soient des composés azotés apportés par la paille de luzerne qui provoquent cette décomposition plus rapide des matières organiques provenant du sol. En effet cette interaction ne s'accroît pas en fonction des doses de paille ajoutées.

1.5. EVOLUTION DES MATIERES HUMIQUES DANS LES MODELES

1.5.1. EVOLUTION DES MATIERES HUMIQUES DANS L' HORIZON A

Le fractionnement physico-chimique des matières humiques contenues dans l'horizon A des modèles fait apparaître de grandes différences quant à l'influence des doses de paille ajoutées et pour la cinétique d'évolution des différentes fractions en fonction de la durée d'incubation.

Influence des doses de paille de luzerne ajoutées:

L'analyse des matières humiques contenues dans la paille de luzerne calibrée et dans le sol placé dans l'horizon A des modèles a permis de calculer les teneurs théoriques en carbone des fractions humiques dans les différents mélanges sol-paille à l'instant zéro (tabl.12 et annexe 7, chiffres entre parenthèse).

Les teneurs en carbone de la plupart des fractions restent, par la suite, proportionnelles au carbone apporté par la paille, pour chacune des durées d'incubation. Par exemple pour les matières humiques extractibles:

$$(13) \quad C_{MH} \text{ extractibles} = C_{MH} (OP1) + \alpha \times C_{PL}$$

Toutefois la pente " α " des droites de régression diffèrent beaucoup suivant les fractions. Par exemple (tabl.13), le coefficient de pente des droites de régression est au moins deux fois plus élevé pour les matières organiques non-extractibles (Matières Organiques Légères + HUMine), que pour les Matières Humiques extractibles par l'acide phosphorique (Acides Fulviques Libres), et par les solvants alcalins (Acides Humiques et Acides Fulviques extraits par le pyrophosphate de sodium ou par la soude). Dans le détail ce sont surtout les Matières Organiques Légères séparées par densimétrie ($d < 1,2$), l'Humine ou matières organiques résiduelles et dans une moindre mesure les Acides Humiques (AHP+AHS) qui restent proportionnels aux doses de paille ajoutées (tabl.13). Par contre au delà des premiers jours, la pente des droites de régressions devient presque nulle pour les Acides Fulviques (Libres et/ou extraits par le Pyrophosphate et par la Soude).

L'estimation des teneurs en carbone des Matières Humiques $C_{MH} (OP1)$ pour un apport de paille nul diffère assez peu des valeurs mesurées (traitement F_0) pour les matières humiques extractibles. Par contre elles sont nettement plus faibles pour les matières organiques non-extractibles $C_{MOL+HUM} (OP1)$, sauf en début et fin d'expérience. Ceci paraît indiquer que l'effet d'incitation ou "priming effect" dû à l'apport de paille accélère principalement la décomposition de la lignine et de la cellulose des débris végétaux (MOL) et humine séquestrée (HUM) provenant du sol, mais a peu d'effet sur la vitesse de décomposition des matières humiques extractibles (MH) existant dans le sol placé dans l'horizon A des modèles.

Cinétique d'évolution des fractions humiques en fonction de la durée

d'incubation:

Pour chaque dose de paille ajoutée, on observe une évolution très différente dans le temps des différentes matières humiques (fig.9).

TABLEAU 12

MATIERES HUMIQUES contenues dans le foin de Luzerne

Fractions::	Acides Fulviques			Acides Humiques		Résidus ::	Total
	AFL	AFP	AFS	AHP	AHS			HUM
Carbone	8,22	0,59	0,56	3,44	2,31	25,0	40,1
Azote	0,31	----- 0,54 -----				1,97	2,83
C/N	26,4	----- 12,8 -----				12,7	14,2

AFL Acides Fulviques libres (extraits par l'acide phosphorique 2 N)
 AFP - - - - - Pyro (extraits par le pyrophosphate de Na)
 AFS - - - - - Soude (extraits par la soude N/10)
 AHP Acides Humiques Pyro (extraits par le pyrophosphate de Na)
 AHS - - - - - Soude (extraits par la soude NaOH N/10)
 HUM Résidus végétaux

La paille de foin de Luzerne utilisée dans cette expérience a été hachée et calibrée ; fraction utilisée entre 0,2 et 2 mm.
 L'extraction des Matières Humiques a été réalisée sur un échantillon de paille calibrée finement broyée (inf. 0,5 mm).
 Humidité (mesurée par séchage 105 degrés) = 9,26 pour cent.

Les Acides Fulviques Libres décroissent rapidement au cours des quinze premiers jours et les teneurs restent à peu près constantes après le trentième jour.

Les teneurs en Acides Fulviques, extraits par le pyrophosphate et par la soude, décroissent pendant trois premiers mois, puis remontent légèrement en fin d'expérience.

Les teneurs en Acides Humiques des horizons A enrichis par l'enfouissement de paille, augmentent lentement pendant les trois premiers mois, puis décroissent ensuite en fin d'expérience.

Il y a donc une évolution inverse des teneurs en Acides Fulviques et en Acides Humiques dans l'horizon A.

On est amené à supposer que pendant les trois premiers mois, une partie des composés préhumiques apportés par la paille se polymérisent en acides humiques ou s'insolubilisent en humine; les autres acides fulviques se décomposent ou sont lixiviés.

Pendant les mois suivants, la synthèse des acides fulviques et leur fixation l'emporte sur leur décomposition ou leur lessivage, à peu près également pour les différentes doses de paille apportées. Par contre les acides humiques provenant de l'humification de la paille décroissent et les produits de leur décomposition et oxydation sont probablement en partie à l'origine de l'accroissement des teneurs en acides fulviques dans l'horizon A, en fin d'expérience.

Au total, les teneurs de l'horizon A en matières humiques extractibles décroissent fortement pendant le premier mois, plus faiblement pendant les deux mois suivants, et augmentent très faiblement ensuite.

Les teneurs en Matières Organiques Légères décroissent fortement au cours des trois premiers mois, puis très lentement ensuite.

Les teneurs en carbone des culots résiduels ou HUMINE, qui diffèrent fortement suivant les doses de paille ajoutées, sont à peu près constantes pendant les quinze premiers jours. Ensuite elles décroissent, pour les quatre traitements, suivant des cinétiques du premier ordre (tabl.14):

$$(14) \quad C_{MOL+HUM} = C_{MOL+HUM} (t=0) \times e^{-K \times t}$$

Le temps de demi-vie du carbone de ces matières organiques non-extractibles est légèrement inférieur à celui du carbone total, et les estimations des teneurs en carbone initiales $C_{MOL+HUM} (t=0)$ diffèrent assez peu de la somme des teneurs initiales mesurées sur le sol et sur la paille de luzerne.

Pour chacune des doses de paille ajoutée, les cinétiques d'évolution des teneurs en carbone des différentes fractions humiques s'ajustent difficilement à une expression mathématique simple en fonction du temps d'incubation. Cependant l'ensemble des matières humiques extractibles (AFL+AH+AF) s'ajuste grossièrement à une fonction puissance pour les doses de paille F_3 et F_4 .

TABLEAU 13

Modèle A+B Effets du Carbone de la paille ajoutée (Cpl) sur C-MH
 ----- Carbone (mg C /g sol) des MATIERES HUMIQUES extractibles
 (Horizon A) Cmh (extractibles) = Cmh (opl) + alpha * Cpl

Temps (jours) d'incubation	Cmh pour Fl mesures sans apport de paille	Cmh (opl) estimations pour Cpl=0	alpha paramètre de transformation de Cpl en Cmht	R ² Coefficient de détermination
1	11,40	11,39	0,268	0,99
15	10,37	10,71	0,134	0,95
30	8,55	8,46	0,105	0,90
90	7,64	7,30	0,117	0,91
180	9,42	9,13	0,043	0,72

Modèle A+B Effets du Carbone de la paille (Cpl) sur C non-extractible
 ----- Cmol+hum des Mat.Orga,Légères et de l'Humine (mg C/g sol)
 (Horizon A) Cmol+hum (non-extractibles) = Cmol+hum (opl) + alpha * Cpl

Temps (jours) d'incubation	Cmol+hum pour Fl mesures sans apport de paille	Cmol+hum (opl) estimations pour Cpl=0	alpha paramètre de transformation en Cmol+hum	R ² Coefficient de détermination
0	(16,25)		(0,645)	
1	15,42	15,46	0,572	0,98
15	16,14	14,36	0,617	0,91
30	16,05	15,70	0,537	0,99
90	17,76	15,30	0,284	0,95
180	12,27	12,20	0,219	0,99

FIGURE 9

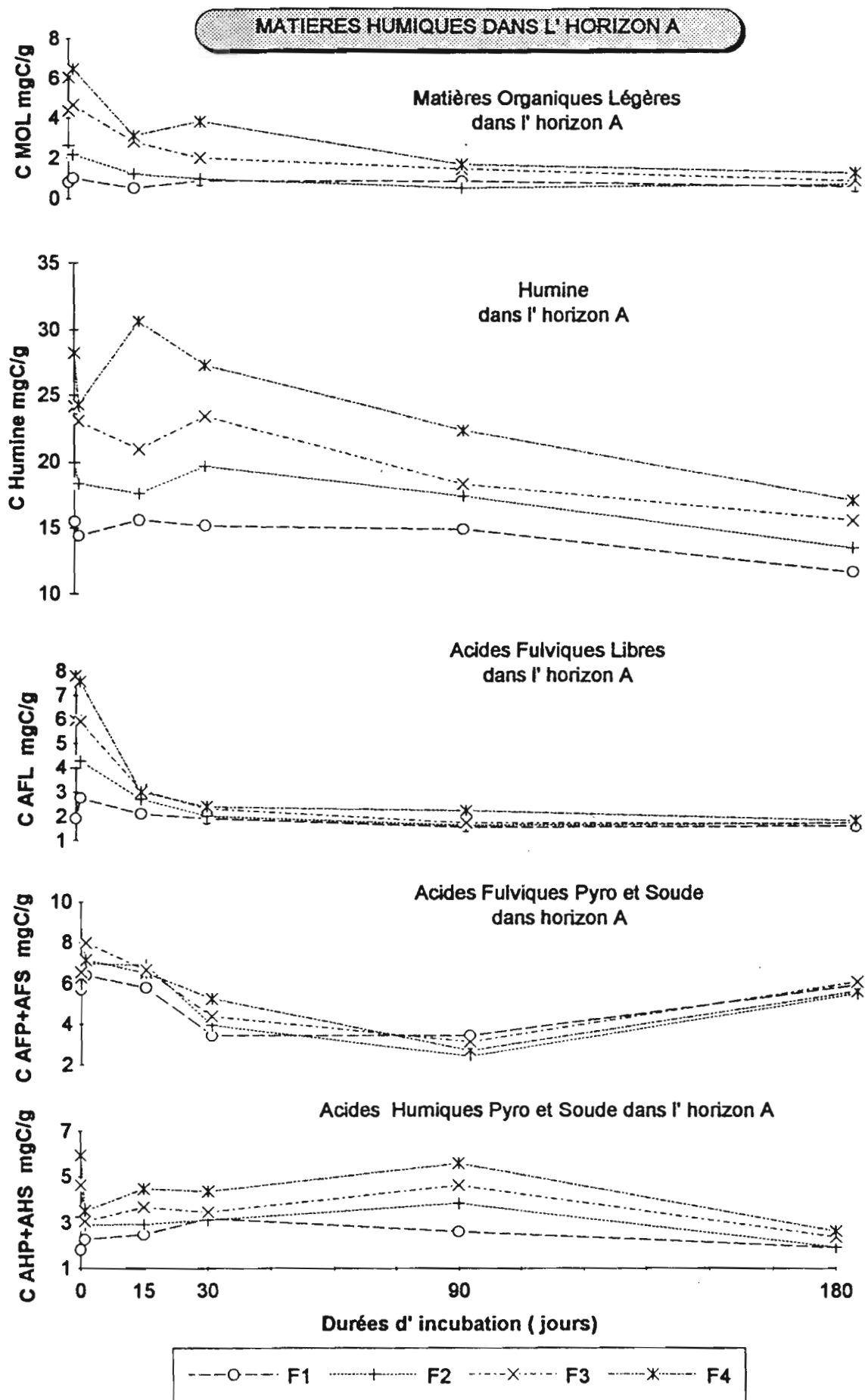


TABLEAU 14

Modèle A+B Cinétique d'évolution des fractions non extractibles
 ----- Carbone des Mat, Orga, Légères et de l'Humine (mgC/g)
 (Horizon A) $C_{mol+hum}(non-extractibles) = C_{mol+hum}(t=0) * exp(-K*t)$

FUMURES	$C_{mol+hum}(o)$ somme des teneurs initiales	$C_{mol+hum}(t=0)$ teneurs calculées pour t = 0	K (jours ⁻¹)	T 1/2 Demi-vie Log(2)/-K	R ² Coefficient de détermination
F1	(16,25)	16,37	0,00135	513	0,78
F2	(22,56)	21,17	0,00215	322	0,89
F3	(28,55)	27,03	0,00292	237	0,93
F4	(34,27)	33,54	0,00339	204	0,96

1.5.2.: EVOLUTION DES MATIERES HUMIQUES DANS L'HORIZON B

Nous avons vu que les teneurs en carbone total de l' horizon B s'accroissent significativement au cours du premier mois, pour les modèles dont l'horizon A a été enrichi en paille de luzerne. Toutefois l'accumulation nette de matières organiques dans l' horizon B décroît progressivement, et le bilan net du processus est pratiquement nul au sixième mois. Le problème qui se pose est d'identifier les composés organiques lessivés qui sont stockés transitoirement dans l'horizon B.

L'extraction et le dosage des matières humiques dans l'horizon B (fig.10, et annexe 8) montrent que dès le premier jour, il y a enrichissement de cet horizon en Acides Fulviques, principalement en Acides Fulviques Libres pour les traitements F₂, F₃ et F₄. Toutefois le bilan net des acides fulviques dans l' horizon B devient rapidement négatif, et les teneurs en acides fulviques décroissent et se stabilisent entre le quinzième et le trentième jour à un niveau à peine plus élevé pour les modèles F₃ et F₄ que pour le témoin F₁.

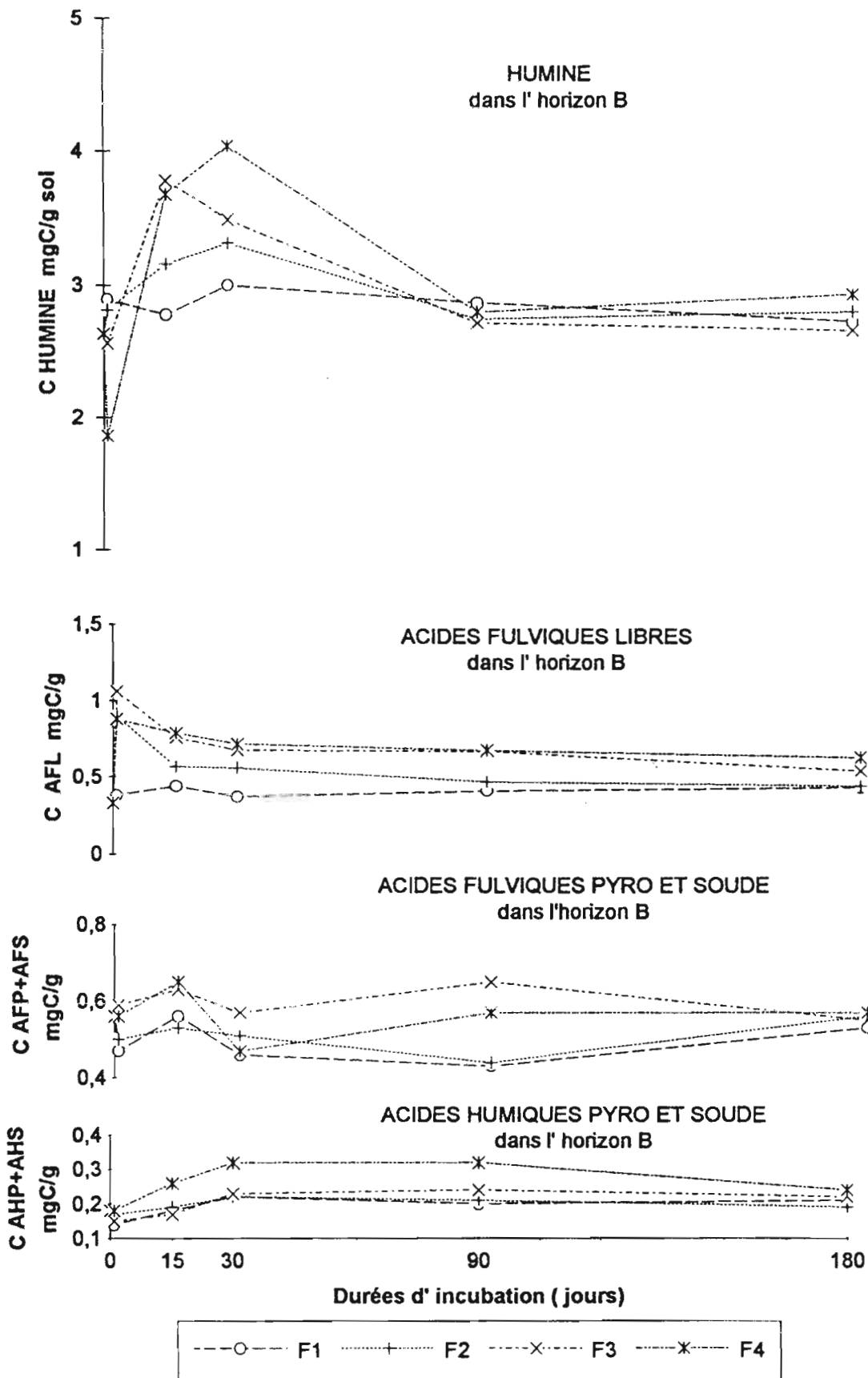
Les Acides Humiques extraits de l'horizon B par le pyrophosphate et par la soude sont très peu abondants. Les teneurs en AHP et AHS augmentent imperceptiblement à partir du quinzième jour notamment pour le traitement F₄; mais au bout de six mois les teneurs en acides humiques de l'horizon B ne diffèrent plus suivant les doses de paille ajoutées.

L'essentiel des matières organiques provenant de la décomposition de la paille qui sont lessivées et qui s'accumulent transitoirement entre le quinzième et le quatre-vingt-dixième jour dans l'horizon B correspondent donc à des matières organiques non-extractibles ou Humine d'insolubilisation. Cette fixation temporaire de composés organiques dans l'horizon B ou leur stabilisation (protection contre leur biodégradation) n'est donc pas irréversible. Le régime hydrique, sans dessiccation poussée des modèles, explique sans doute pourquoi malgré un flux organique important qui traverse cet horizon B, il n'y a pas une accumulation significative et durable de matières humiques à ce niveau.

En résumé, les cinétiques de décomposition des différentes fractions humiques provenant de la paille apportée dans l'horizon A, diffèrent fortement. A côté de la décroissance rapide des acides fulviques, des matières organiques légères, une partie importante des produits de décomposition est insolubilisée ou séquestrée dans l'humine vers le quinzième jour, et une partie plus limitée polymérisée en acides humiques pendant les trois premiers mois. Par la suite toutes ces fractions se décomposent ou sont lessivées hors de l'horizon A, plus ou moins rapidement. Une partie de ces lessivats s'accumulent temporairement dans l'horizon B des modèles sous forme d'humine d'insolubilisation.

FIGURE 10

MATIÈRES HUMIQUES DANS L' HORIZON B



1.6. EVOLUTION DES POLYSACCHARIDES DANS LES MODELES

1.6.1. EVOLUTION DES POLYSACCHARIDES DANS L' HORIZON A

Le dosage des sucres réducteurs provenant de l'hydrolyse acide des sols montre que leur teneurs en polysaccharides dépendent non seulement des doses de paille de luzerne ajoutées dans l'horizon A des modèles, mais aussi de la durée d'incubation. (annexe 9)

Influence des doses de paille ajoutées sur la teneur en polysaccharides de l' horizon A des modèles:

Comme pour les teneurs en carbone total, on constate que pour chacune des durées d'incubation, les teneurs en sucres réducteurs provenant de l'hydrolyse des polysaccharides augmentent proportionnellement à la quantité de carbone apportée par la paille de luzerne (tabl.15).

$$(15) \quad C_{\text{polysac.}} = C_{\text{poly.}}(\text{opl}) + \alpha \times C_{\text{p1}}$$

Dans cette équation, $C_{\text{polysac.}}$ est la teneur en carbone du glucose équivalent aux sucres contenus dans l'hydrolysate (exprimé en mg C/g sol). C_{p1} est la teneur initiale en carbone provenant de la paille de luzerne ajoutée.

La pente " α " des droites de régression est nettement plus faible que pour les teneurs en carbone total. Au cours des premiers jours d'incubation, la teneur en carbone des polysaccharides contenus dans l'horizon A augmente d'environ 1/5ème du carbone de la paille de luzerne ajoutée. Au bout de six mois, la teneur en carbone des polysaccharides restant ne représente plus que 1/50ème de la teneur initiale en carbone ajouté sous forme de paille de luzerne.

Les variations de " α " en fonction de la durée d'incubation s'ajustent assez bien à la régression exponentielle suivante:

$$\alpha = \alpha_0 \times e^{-k_{\text{pp}} \times t} = 0,213 \times e^{-0,0133 \times t} \quad R^2 = 0,95$$

dans laquelle $\alpha_0 = 0,213$ est la fraction du carbone de la paille qui reste sous forme de polysaccharides dans l'horizon A des modèles en début d'incubation (soit 21%); et k_{pp} est la constante journalière de disparition du carbone des polysaccharides qui proviennent de la paille de luzerne ajoutée.

Les estimations de $C_{\text{poly.}}(\text{opl})$, teneur en carbone de l'équivalent glucose des polysaccharides contenus dans l' horizon A pour un apport de paille nul, sont très proches des teneurs en polysaccharides mesurées pour le traitement F_1 en début et en fin d'expérience. Entre les deux, les teneurs mesurées sont légèrement plus fortes que les valeurs estimées par l'ordonnée à l'origine des régressions linéaires (tabl.15). $C_{\text{poly.}}(\text{opl})$ décroît avec la durée d'incubation suivant une cinétique qui s'ajuste mieux à une fonction puissance qu' à une fonction exponentielle.

$$C_{\text{poly}}(\text{opl}) = C_{\text{poly}}(1) \times t^{-k_{\text{ps}}} = 3,74 \times t^{-0,0573} \quad R^2 = 0,98$$

Dans cette équation $C_{\text{poly}}(1) = 3,74$ est la quantité de carbone des polysaccharides présente le premier jour dans l'horizon A des modèles (F_1), non-enrichis en paille de luzerne. Elle est pratiquement identique à la teneur en polysaccharides qui a été mesurée.

Si l'on reporte ces estimations en fonction de " t ", de " α " et de " $C_{\text{poly.}}(\text{opl})$ " dans l'équation (15), on obtient l'équation suivante à deux compartiments (polysaccharides provenant du sol et provenant de la paille):

TABLEAU 15

Modèle A+B Relations entre les teneurs en POLYSACCHARIDES
 ***** dans l'horizon A et les doses de paille ajoutées

$$C_{poly} = C_{poly}(O_{pl}) + \text{Alpha} * C_{pl}$$

TEMPS d'incubation	C _{poly} (F1) teneurs mesurées	C _{poly} (O _{pl}) estimation sans paille	Alpha	R ² Coefficient de détermination
1 jour	3,76	3,78	0,2133	0,99
15	3,52	3,13	0,2296	0,98
30	3,20	3,07	0,0996	0,98
90	3,00	2,88	0,0687	0,94
180	2,77	2,82	0,0196	0,95

N,B: Les teneurs en polysaccharides sont exprimées en Carbone
 de l'équivalent en glucose (mg C /g de sol)

C_{pl} = Carbone provenant de la paille de luzerne ajoutée

$$\text{Alpha} = 0,213 * \text{EXP} (-0,0133 * t) \quad R^2=0,95$$

$$C_{poly}(O_{pl}) = 3,74 * (t ^{-0,0573}) \quad R^2=0,98$$

$$(15') \quad C_{poly.} = C_{poly(t=0)} \times t^{-Kp} + \alpha_0 \times C_{p1} \times e^{-Kpp \times t}$$

$$\text{ou} \quad C_{poly.} = 3,74 \times t^{-0,0573} + 0,213 \times C_{p1} \times e^{-0,0133 \times t}$$

Cinétique d' évolution des polysaccharides en fonction de la durée

d'incubation:

Pour chaque dose de paille de luzerne ajoutée, les teneurs en carbone des polysaccharides restant dans l'horizon A décroissent en fonction de la durée d'incubation suivant une cinétique approximativement du premier ordre (tabl.16):

$$(16) \quad C_{poly} = C_{poly(t=0)} \times e^{-Kp \times t}$$

Dans cette équation (16), Kp représente la constante journalière de décomposition (minéralisation et perte par lixiviation) du carbone organique de l'ensemble des polysaccharides contenus dans l'horizon A des modèles. Elle augmente très fortement en fonction des doses de paille ajoutées:

$Kp = K_{poly, sol} + \Delta K_{poly} \times C_{p1} = 0,00156 + 0,0001594 \times C_{p1} \quad R^2=0,986$
 c'est à dire que la constante de décomposition journalière du carbone des polysaccharides contenus dans le sol placé dans l'horizon A des modèles s'accroît d'environ 1/10ème du carbone de la paille ajoutée:

$$Kp \# K_{poly, sol} \times (1 + 0,1 \times C_{p1}) \text{ jours}^{-1}.$$

On constate que $K_{poly, sol}$, estimation de la constante de décomposition journalière des polysaccharides présents dans le sol placé dans l'horizon A des modèles est pratiquement identique à la constante journalière de la régression exponentielle en fonction du temps d'incubation, obtenue par ajustement sur les teneurs en polysaccharides mesurées dans les modèles (F₁) sans apport de paille.

$C_{poly(t=0)}$ correspond à l'estimation des teneurs initiales en polysaccharides de l'horizon A, pour les différentes doses de paille ajoutées. On constate que l'estimation $C_{poly(t=0)}$ augmente proportionnellement aux doses de paille ajoutées suivant la régression linéaire suivante:

$$C_{poly(t=0)} = C_{poly,0} + \alpha_p \times C_{p1} = 3,34 + 0,197 \times C_{p1} \quad R^2 = 0,990$$

$C_{poly,0} = 3,34$ est très proche de la teneur moyenne en carbone des polysaccharides du sol placé dans l' horizon A des modèles: 3,30. Par ailleurs la fraction " α_p " du carbone de la paille ajoutée qui reste dans l'horizon A sous forme de polysaccharides diffère assez peu du paramètre " α_0 " précédemment obtenu. C'est à dire que la teneur en carbone des polysaccharides provenant de la paille est égale à 20% du carbone de la paille en début d'incubation. Toutefois, l'augmentation apparente de $C_{poly(t=0)}$ entre les traitements (F₁) sans apport de paille, et (F₂) est un peu plus faible qu' entre (F₂), (F₃) et (F₄). La droite de régression pour les trois traitements avec apport de paille est la suivante:

$$C_{poly(t=0)} = 2,801 + 0,222 \times C_{p1} \quad R^2 = 0,999$$

La pente de cette droite est un peu plus forte et pratiquement identique à α_0 ; mais l' ordonnée à l'origine est nettement plus faible que la teneur en carbone des polysaccharides du sol placé dans l'horizon A du modèle. Il parait donc exister une interaction de l'ordre de: 0,5 mgC/g sol, entre la décomposition des polysaccharides provenant du sol avec et sans apport de paille.

En reportant dans l'équation (16), les estimations de " K_p " et de " $C_{poly(t=0)}$ " en fonction de C_{p1} et de la teneur initiale en carbone des polysaccharides contenus dans le sol $C_{poly,0}$, on obtient une nouvelle

TABLEAU 16

Modèle A+B Cinétique d'évolution des POLYSACCHARIDES
 ----- Carbone de l'équivalent glucose (mg C /g sol)
 (Horizon A) Cpoly = Cpoly(t=0) * exp(-Kp*t)

FUMURES	Cpoly (t=0) teneurs teneur calculées initiale pour t=0	Kp (jours-1)	T 1/2 demi-vie Log(2)/-Kp (jours)	R^2 Coefficient de détermination
F1 (3,30)	3,56	-0,00153	450	0,85
F2	4,98	-0,00299	230	0,78
F3	7,03	-0,00493	140	0,81
F4	9,01	-0,00582	120	0,88

$Kp = 0,00156 + 0,000159 * Cpl$ $R^2=0,986$
 $Cpoly (t=0) = 3,34 + 0,197 * Cpl$ $R^2=0,990$
 Cpl est la teneur en carbone de la paille de luzerne ajoutée

équation de l'évolution des polysaccharides dans l'horizon A des différents modèles:

$$(16') C_{poly} = (C_{poly,0} + \alpha_p \times C_{p1}) \times e^{(-K_{poly} \cdot t + \Delta K_{poly} \times C_{p1}) \times t}$$

soit: $C_{poly} = (3,34 + 0,197 \times C_{p1}) \times e^{-(0,00156 + 0,000159 \times C_{p1}) \times t}$

La valeur descriptive de cette équation (16') est probablement moins bonne que celle obtenue par l'équation (15') du fait de la médiocrité des coefficients de détermination des ajustements à des cinétiques du premier ordre (tabl.16).

1.6.2. EVOLUTION DES POLYSACCHARIDES DANS L' HORIZON B

La teneur en polysaccharides du sol placé dans l'horizon B des modèles est très faible. La teneur en carbone de ces polysaccharides représente environ huit pour cent de la teneur de ce sol en carbone total. La percolation des eaux de ressuyage et le léger excès d'eau apporté chaque semaine provoque un faible enrichissement en polysaccharides de l'horizon B pendant les quinze premiers jours, nettement plus marqué pour les horizons B placés sous un horizon A enrichi en paille de luzerne. Dès le trentième jour, les teneurs en carbone des polysaccharides de l'horizon B baissent faiblement et représentent seulement 6 à 7 % du carbone total. En fin d'expérience, les teneurs en polysaccharides de l'horizon B auraient tendance à augmenter légèrement.

Influence des doses de paille ajoutées

L'influence des doses de paille ajoutée dans l'horizon A, sur la teneur en polysaccharides de l' horizon B (cf.annexe 9), est faiblement marquée et la proportionnalité avec le carbone de la paille apportée n'est qu' approximative.

Effet de la durée d'incubation:

L'accumulation nette de polysaccharides dans l'horizon B est encore plus transitoire que pour le carbone total. Ceci s'explique par une constante journalière moyenne de décomposition ou disparition des polysaccharides (K_p) qui est plus grande que celle de l'ensemble des matières organiques (K_c). Par conséquent le temps moyen de résidence des polysaccharides dans l'horizon B des modèles est plus faible, et leur illuviation très temporaire.

1.7. EVOLUTION ET BILAN DES MATIERES ORGANIQUES DANS LES MODELES

Les teneurs en carbone et en azote total dans les horizons A et B permettent de calculer les stocks dans l'ensemble des différents modèles, au cours des six mois d'expérience. Toutefois il est logique de penser que le poids de l'horizon A décroît légèrement du fait de la décomposition de la paille de luzerne ajoutée, et du lessivage d'une partie des matières organiques et minérales provenant de la minéralisation de ces matières végétales. Nous avons estimé que le poids de matière végétale restant à l'instant "t" était approximativement égal au poids de paille ajoutée initialement, multiplié par le quotient de la différence des teneurs en carbone avec celle du traitement F₁ (sans apport de paille) au temps t, divisé par cette différence au temps zéro.

Les variations des stocks de C et N au cours de l'expérience permettent d'estimer globalement les pertes par minéralisation et lessivage de l'horizon A et les gains ou pertes de carbone et d'azote dans l'horizon B (annexe 12). La comparaison de ces pertes pour l'ensemble des modèles avec le carbone recueilli dans les percolats au cours de l'expérience permet d'estimer par différence le gaz carbonique dégagé et la volatilisation de l'azote, pour chacun des traitements et pour les différentes périodes d'incubation.

1.7.1. PERTES DE CARBONE

Les pertes de carbone dans l'horizon A calculées à partir de l'évolution des stocks diffèrent assez peu de celles évaluées à partir de variations des teneurs en carbone dans cet horizon.

PERTES DE L' HORIZON A DES MODELES:

Influence des doses de paille ajoutées:

Pour chaque durée d'incubation, nous constatons (tabl.17) que les pertes de carbone de l'horizon A: (P_{CA}) sont proportionnelles, à partir du trentième jour, aux quantités de carbone de la paille apportées (C_{P1}):

$$P_{CA} = P_{CA}(0) + \alpha \times C_{P1}$$

La pente "α" des droites de régression s'accroît au cours de l'incubation. Si l'on ne tient pas compte des pertes mesurées le premier jour, on constate que "α" s'ajuste étroitement à une fonction de la forme:

$$\alpha = \alpha_0 \times (1 - e^{-K_{CP} \times t}) \quad \text{pour } 15 < t < 180 \text{ jours}$$

Dans cette équation $\alpha_0 = 0,767$ est la fraction du carbone de la paille de luzerne apportée qui est potentiellement décomposable ou labile et qui sera éliminée de l'horizon A du modèle, soit 76,7 % du carbone de la paille apportée. La constante de décomposition journalière de cette fraction labile de la paille: $K_{CP} = 0,0193 \text{ j}^{-1}$ est très élevée, puisque son temps de demi-vie $T_{1/2} = 36$ jours. (tabl.17).

L'estimation des pertes pour un apport de paille nul ($P_{CA}(0)$), est analogue à celle mesurée pour le traitement F₁ sauf au quinzième jour.

Selon PAL et BROADBENT (1975), on peut pour chaque durée d'incubation, évaluer un indice d'incitation ou "priming ratio" du carbone (PR_C), qui est égal au quotient :

$PR_C = PC_A(t_0) / PC_A(t_1)$. Cet indice est voisin de un à partir du trentième jour. Tandis que au 15ème jour, il est de l'ordre de 1,8. Les valeurs de cet indice paraissent donc indiquer que l'apport de paille provoque une accélération de la décomposition des matières organiques du sol en début d'expérience. Par la suite la décomposition et les pertes de carbone provenant des deux types de matières organiques deviennent additives sans interaction de l'une sur l'autre.

Evolution des pertes en carbone en fonction du temps d'incubation:

L'estimation des pertes sans apport de paille s'ajuste assez bien à une cinétique du premier ordre de la forme:

$$PC_A(t_0) = PC_0 \times (1 - e^{-K_{ca} \times t})$$

Dans cette équation $PC_0 = 1,14$ est l'estimation du stock de carbone provenant du sol placé dans l'horizon A qui est potentiellement décomposable ou labile. C'est à dire que seulement 17 % du carbone du sol placé dans l'horizon A des modèles serait labile ou potentiellement décomposable. Mais la constante de décomposition journalière de la fraction labile du carbone du sol $K_{ca} = 0,0199 J^{-1}$ est assez élevée et correspond à un temps moyen de demi-vie $T_{1/2} = LOG(2)/K_{ca}$ de 35 jours, peu différent du temps de demi-vie de la fraction labile de la paille de luzerne ajoutée dans cet horizon.

Au total, les pertes de carbone dans l'horizon A des modèles peuvent être décrites par l'équation suivante:

$$PC_A = 1,14 \times (1 - e^{-0,0199 \times t}) + 0,767 \times C_{p1} \times (1 - e^{-0,0193 \times t}).$$

GAINS ET PERTES DANS L'HORIZON B.

Influence des doses de paille ajoutées dans l'horizon A

Les stocks de carbone dans l'horizon B varient comme les teneurs en carbone; c'est à dire que les gains de carbone dans l'horizon B sont modestes. Néanmoins, l'augmentation des stocks de carbone dans l'horizon B, est grossièrement proportionnelle au carbone ajouté dans l'horizon A. Le coefficient de proportionnalité est deux fois plus important pendant le premier mois que par la suite. L'accumulation de carbone dans l'horizon B est donc surtout transitoire (tabl.4). Ensuite les stocks de carbone dans l'horizon B décroissent et le gain de carbone paraît se stabiliser à des niveaux plus faibles, mais qui sont proportionnels aux doses de paille ajoutées dans l'horizon A.

PERTES DE L' ENSEMBLE DES MODELES:

Au total, dès la fin du premier mois (tabl.17), les pertes de carbone (PC_{AB}) dans l'ensemble des modèles sont strictement proportionnelles aux quantités de carbone de la paille de luzerne apportées initialement (C_{p1}).

$$PC_{AB} = PC_{AB}(t_0) + \alpha \times C_{p1} \quad \text{pour } 30 < t < 180 \text{ jours}$$

Pendant les quinze premiers jours, les pertes de carbone dans l'ensemble des modèles sont faibles, quelles que soient les doses de paille ajoutées, car une partie des matières carbonées lessivées dans l'horizon A s'accumulent transitoirement dans l'horizon B. Ensuite les

TABLEAU 17

Modèle A+B Pertes de Carbone dans l'horizon A des modèles (PCa)
 en fonction du Carbone ajouté dans l'apport de paille (Cpl)
 (Horizon A) $PCa = PCa(o) + \alpha * Cpl$

Durées d'incubation (jours)	PCa (f1) sans apport de paille	PCa (o) estimations pour Cpl=0	alpha	R ² Coefficient de détermination	indice d'incitation (PRc)
1	0,05	-0,019	0,1	0,485	-
15	0,29	0,512	0,175	0,767	1,76
30	0,55	0,535	0,346	0,997	0,97
90	0,83	0,930	0,634	0,992	1,12
180 jours	1,14	1,121	0,742	0,998	0,98

$\alpha = 0,767 * (1 - \exp(-0,0193*t))$ T1/2=36 R²=0,99 (sans 1er j.)
 $PCa(o) = 1,144 * (1 - \exp(-0,0199*t))$ T1/2=35 R²=0,99
 L'indice d'incitation (ou Priming Ratio) PRc = PC(o) / PC(f1)

Modèle A+B Pertes de Carbone dans l'ensemble des modèles (PCab)
 en fonction du Carbone ajouté dans l'apport de paille (Cpl)
 $PCab = PCab(o) + \alpha * Cpl$

Durées d'incubation (jours)	PCab (f1) sans apport de paille	PCab (o) estimations pour Cpl=0	alpha	R ² Coefficient de détermination	indice d'incitation (PRc)
1	0,02	-0,075	NS	0,45	-
15	0,23	0,436	0,152	0,747	1,90
30	0,52	0,522	0,317	0,999	1,00
90	0,83	0,938	0,621	0,991	0,88
180 jours	1,14	1,122	0,729	0,998	0,98

$\alpha = 0,767 * (1 - \exp(-0,0175*t))$ T1/2=40 R²=0,99
 $PCab(o) = 1,128 * (1 - \exp(-0,024*t))$ T1/2=29 R²=0,96

pertes s'accroissent de plus en plus dans le temps en fonction de la quantité de carbone de la paille de luzerne qui est apportée.

Les pentes " α " des droites de régression qui passent de 0,3 à la fin du premier mois à plus de 0,7 au sixième mois, s'accroissent de plus en plus lentement. Elles s'ajustent parfaitement à une fonction de la forme:

$$\alpha = \alpha_0 \times (1 - e^{-K_{CP} \times t}).$$

Dans cette expression $\alpha_0 = 0,767$ représente le taux de carbone de la paille qui est potentiellement décomposable et perdu par l'ensemble des modèles. C'est à dire que 76,7 % du carbone de cette paille de luzerne est labile et sera minéralisé ou éliminé de l'ensemble du modèle par volatilisation ou lixiviation. La constante journalière de décomposition et d'élimination du carbone de cette fraction de la paille $K_{CP} = 0,01745 \text{ j}^{-1}$ est un peu moins élevée que pour le seul horizon A, et le temps de demi-vie $T_{1/2} = 40$ jours est donc légèrement plus long.

Les pertes de carbone provenant des sols placés dans les horizons A et B des modèles, sans apport de paille, $PC_{AB}(\infty)$ peuvent être ajustées à une fonction de la même forme:

$$PC_{AB}(\infty) = PC_0 \times (1 - e^{-K_{CS} \times t})$$

Le carbone des sols des modèles, qui est potentiellement décomposable et perdu : $PC_0 = 1,128$ correspond à environ 15 % du stock total de carbone des sols placés dans les horizons A et B des modèles. La constante de décomposition journalière de cette fraction labile du carbone des sols des modèles $K_{CS} = 0,024 \text{ j}^{-1}$ est nettement plus élevée que pour le sol de l'horizon A seul, et le demi-temps moyen de résidence $T_{1/2} = 29$ jours, est donc un peu plus bref.

Au total les pertes de carbone par l'ensemble des modèles (A+B) peuvent être décrites comme la somme des pertes de carbone labile provenant des sols et des pertes de carbone provenant de la fraction facilement décomposable de la paille de luzerne apportée soit:

$$PC_{AB} = 1,128 \times (1 - e^{-0,024 \times t}) + 0,767 \times C_{p1} \times (1 - e^{-0,0175 \times t})$$

1.7.2. PERTES D'AZOTE

PERTES DE L' HORIZON A :

Influence des doses de paille ajoutées

L' évolution des stocks d'azote dans l'horizon A des modèles montre que les pertes d'azote pour chaque durée d'incubation sont proportionnelles aux quantités d'azote apportées par la paille de luzerne enfouie (tabl.18):

$$PNA = PNA(0) + \beta \times Np1$$

Les pentes " β " des droites de régression sont très faibles pendant les premiers jours, ce qui conduit à une estimation médiocre de ce coefficient de proportionnalité entre les pertes et les apports d'azote pendant les quinze premiers jours. Par la suite, " β " augmente avec le temps d'incubation et s'ajuste étroitement à la fonction suivante:

$$\beta = \beta_0 \times (1 - e^{-K_{ND} \times t})$$

dans laquelle $\beta_0 = 0,753$ représente la fraction de l' azote de la paille qui est potentiellement décomposable et perdue par volatilisation ou lixiviation, hors de l'horizon A des modèles. L'estimation de β_0 est pratiquement identique à α_0 , c'est à dire que environ 75% de l'azote ou du carbone apportés par la paille sont potentiellement décomposables; mais la constante journalière de décomposition de cette fraction de l'azote, $K_{ND} = 0,00904 \text{ j}^{-1}$ est deux fois plus faible que K_{CD} , et le temps de demi-vie ($T_{1/2} = 77 \text{ j}$) est donc deux fois plus long.

$PNA(0)$ qui correspond à l'évaluation des pertes d'azote de l'horizon A pour un apport de paille nul, diffère assez sensiblement de la moyenne des pertes d'azote mesurées pour le traitement F_1 au cours de l'incubation.

Comme pour le carbone, on peut donc définir un indice d'incitation ou "priming ratio" pour l'azote ($PR_N = PNA(0) / PNA(t_1)$), qui est égal au quotient des pertes d'azote ainsi évaluées: $PNA(0)$ pour un apport de paille nul, divisé par $PNA(t_1)$, c'est à dire les pertes d'azote mesurées pour le traitement F_1 sans apport de paille. Cet indice est égal ou supérieur à 2 pendant les 15 premiers jours, il est voisin de 0,9 ensuite. L'enfouissement de paille de luzerne, paraît donc accélérer la décomposition de l'azote du sol en début d'incubation. Par contre, il provoquerait ensuite un léger ralentissement, entraînant des pertes d'azote provenant du sol un peu plus faible pour les horizons A enrichis en paille que pour ceux sans apport de paille.

Pendant les trois premiers mois, les pertes d'azote provenant du sol de l'horizon A des modèles suivent une cinétique strictement linéaire en fonction du temps d'incubation:

$$PNA(0) = PN_1 + \beta_{NE} \times t$$

Dans cette formule $PN_1 = 11,68$ qui correspondrait à la perte d'azote provenant du sol à l'instant zéro, paraît difficilement explicable. Il est probable qu'il s'agit plutôt d' une surestimation du stock d'azote de l' horizon A à l'instant zéro, qui a été calculée sur la base de la teneur moyenne en azote total du sol utilisé pour garnir l'horizon A des modèles. En effet la variation de teneur initiale en azote du sol correspondant à PN_1 est inférieure à l'intervalle de confiance de la teneur moyenne déterminée sur six échantillons de ce sol.

$\beta_{N_{ms}} = 0,565 \text{ mg N j}^{-1}$ est un coefficient de décroissance ou de perte d'azote provenant du sol, pendant les trois premiers mois. Ces pertes PN_1 suivent une cinétique strictement linéaire, ou d'ordre zéro, en fonction du temps d'incubation. La fraction de l'azote du sol qui est perdue pendant ces trois premiers mois : 50,89 mg N correspond à une forme très labile ou facilement décomposable qui est éliminée de l'horizon A et représente seulement 8,8 % du stock d'azote provenant du sol placé dans l'horizon A des modèles.

Au cours des trois derniers mois, la constante de décomposition de l'azote provenant du sol décroît fortement et les pertes d'azote peuvent être décrites par un ajustement à : $PN_A = SN_0 \times (1 - e^{-K_{N_{ms}} t})$

Dans cette expression $SN_0 = 78,30$ représente une estimation du stock d'azote du sol de l'horizon A qui est potentiellement décomposable. Ce stock se décompose donc en trois compartiments:

- les pertes d'azote initiales $PN_1 = 11,67 \text{ mgN}$ que nous attribuons à une erreur d'estimation du stock d'azote initial,
- les pertes d'azote très labiles $PN_1 = 50,85 \text{ mgN}$ qui suivent une cinétique d'ordre zéro,
- et enfin un stock d'azote potentiellement décomposable $PN_0 = 15,78 \text{ mgN}$ qui évolue suivant une cinétique du premier ordre.

$K_{N_{ms}} = 0,0167 \text{ j}^{-1}$ est la constante de décomposition journalière de cette dernière fraction de l'azote du sol. Son temps de demi-vie ($T_{1/2} = 41,5 \text{ j}$) est donc plus bref que celui de l'azote de la paille.

GAINS OU PERTES D'AZOTE DANS L' HORIZON B:

L'évolution des stocks d'azote dans l' horizon B est considérée comme proportionnelle à l'évolution des teneurs en azote (annexe 2). Les pertes, puis les gains d'azote sont très limités pendant les quinze premiers jours. A partir du trentième jour les gains d'azote dans l'horizon B sont proportionnels aux doses d'azote apportées par la paille dans l'horizon A des modèles. Les gains maxima sont observés au bout de trois mois. L'enrichissement net en azote de l'horizon B décroît ensuite progressivement .

PERTES D'AZOTE DE L'ENSEMBLE DES MODELES.

Pour chaque durée d'incubation, les pertes d'azote de l'ensemble des modèles sont grossièrement proportionnelles à l'apport d'azote par la paille de luzerne enfouie (tabl.18):

$$PN_{AB} = PN_{AB(0)} + \beta \times N_{P1}$$

Le taux de décomposition de l'azote apporté par la paille " β " s'accroît régulièrement en fonction du temps d'incubation :

$$\beta = \beta_0 + \gamma \times t = 0,044 + 0,00286 \times t \quad R^2=0,997$$

Le coefficient " β " de décomposition et d'élimination de l'azote de la paille ajoutée varie linéairement en fonction du temps d'incubation de zéro à 0,56 au bout de 180 jours. C'est à dire que un peu plus de la moitié de l'azote provenant de la paille est perdu par le modèle en six mois.

$PN_{AB(0)}$, qui est l'estimation des pertes en azote de l'ensemble du modèle pour un apport de paille nul, diffère quelque peu des pertes

TABLEAU 18

Modèle A+B Pertes d' AZOTE dans l'horizon A des modèles (PNa)
 en fonction de l' Azote ajouté dans l'apport de paille (Npl)
 (Horizon A) $PNa = PNa(o) + \beta * Npl$ (mg N par modéle)

Durées d'incubation (jours)	PNa (fi) sans apport de paille	PNa (o) estimation pour Npl=0	β	R ² Coefficient de détermination	indice d'incitation (PRn)
1	5	12,4	0,158	0,885	2,48
15	10	19,2	0,112	0,864	1,92
30	32	29,6	0,187	0,996	0,93
90	70	62,4	0,393	0,950	0,89
180 jours	80	74,0	0,619	0,997	0,93

$\beta = 0,753 * (1 - \exp(-0,00904*t))$ $T_{1/2}=77j$ $R^2=0,99$
 $PNa(o) = PNi + PNI = 11,67 + 0,565*t$ (de 1 a 90 jours)
 $PNa(o) = PNi + PNI + PNo = (11,67 + 0,565*90 + 15,78) * (1 - \exp(-0,0167*t))$ pour
 t compris entre 90 et 180 jours
 L'indice d'incitation (Priming Ratio) $PRn = PNa(o) / PNa(fi)$

Modèle A+B Pertes d' AZOTE dans l'ensemble des modèles (PNab)
 en fonction de l'azote ajouté par l'apport de paille (Npl)
 $PNab = PNab(o) + \beta * Npl$ (mg N / modéle)

Durées d'incubation (jours)	PNab (fi) sans apport de paille	PNab (o) estimation pour Npl=0	β	R ² Coefficient de détermination	indice d'incitation (PRn)
1	13	20,0	0,155	0,897	1,54
15	12	19,9	0,098	0,841	1,66
30	32	30,9	0,125	0,996	0,97
90	73	66,0	0,288	0,881	0,90
180 jours	86	78,5	0,565	0,994	0,91

$\beta = 0,0443 + 0,00296 * t$ $R^2=0,997$ (15 au 180ème jour)
 $PNab(o) = PNi + PNI = 11,65 + 0,6062 * t$ pendant les trois premiers mois
 $PNab(o) = PNi + PNI + PNo = (11,65 + 0,6062*90 + 17,16) * (1 - \exp(-0,0164*t))$
 pour t compris entre 90 et 180 jours
 L' indice d'incitation (Priming Ratio) $PRn = PNab(o) / PNab(fi)$

mesurées pour les modèles (F₁). Les pertes évaluées sont un peu plus fortes au cours des 15 premiers jours, et nettement plus faibles à partir du troisième mois.

L'indice d'incitation pour la décomposition de l'azote du sol de l'ensemble du modèle est supérieur à 1,5 pendant les quinze premiers jours d'incubation. Il est de l'ordre de 0,9 pendant les trois derniers mois. L'apport de paille augmenterait les pertes d'azote provenant des sols en début d'incubation, et les diminuerait légèrement pendant les derniers mois.

Comme pour l'horizon A des modèles, les pertes d'azote provenant des sols suivent une cinétique linéaire ou d'ordre zéro, pendant les trois premiers mois:

$$PN_{AB}(0) = PN_{AB}(1) + \beta_{AB} \times t = 11,65 + 0,6062 \times t$$

La perte d'azote initiale de l'ensemble du modèle $PN_{AB}(1)$ est très proche de celle évaluée pour l'horizon A seulement. L'origine de cette perte initiale -interaction ou erreur d'estimation du stock initial- n'est pas expliquée.

Le coefficient de décroissance du stock d'azote des sols dans l'ensemble des modèles $\beta_{AB} = 0,6062 \text{ mg N j}^{-1}$ est légèrement plus élevé que pour l'horizon A seul. Les pertes d'azote au troisième mois représentent: 54,56 mg N, soit environ 8,8 % du stock initial d'azote des sols placés dans les deux horizons des modèles.

Les pertes d'azote provenant des sols décroissent pendant les trois derniers mois d'expérience. PN_{AB} peut être décrit par une cinétique exponentielle ou d'ordre un: $PN_{AB} = SN_0 \times (1 - e^{-K_{NA} \times t})$

Dans cette expression $SN_0 = 83,37$ représente l'azote des sols qui est potentiellement décomposable et éliminé de chacun des modèles au cours des trois premiers mois. Comme pour le stock d'azote du sol de l'horizon A, le stock d'azote SN_0 provenant des sols de l'ensemble des modèles se décompose en trois compartiments :

- Les pertes initiales ($PN_1 = 1,65 \text{ mg N}$) qui ne sont pas clairement expliquées,
- les pertes de composés azotés des sols, qui sont très labiles: ($PN_1 = 54,56 \text{ mg N}$), et qui se décomposent pendant les trois premiers mois, suivant une cinétique d'ordre zéro,
- enfin un petit reliquat potentiellement décomposable ($PN_0 = 17,16 \text{ mg N}$).

La constante d'élimination journalière de cet azote potentiellement décomposable K_{NA} est de $0,0164 \text{ j}^{-1}$ soit un temps de demi-vie $T_{1/2} = 42,3 \text{ j}$, qui excède de seulement un jour celui de l'azote potentiellement décomposable contenu dans le sol de l'horizon A.

Au total, les cinétiques d'évolution des pertes d'azote ne correspondent pas, comme pour le carbone, à une simple somme de deux modèles exponentiels correspondant aux pertes d'azote provenant de la paille de luzerne avec celles provenant du sol. Les pertes d'azote provenant du sol doivent être subdivisées en deux compartiments qui suivent successivement des cinétiques différentes, d'ordre zéro et d'ordre un.

Manifestement dans nos expériences, la cinétique d'ordre zéro est dominante pendant les trois premiers mois, et correspond apparemment à la minéralisation et à des pertes d'azote par volatilisation ou lixiviation qui ne sont pas limitées par l'épuisement de ce stock de matières azotées labiles, mais par les débits gazeux ou liquides sortant

des modèles expérimentaux. Nous verrons d'ailleurs que les pertes d'azote recueillies dans les percolats sous les modèles (A) ont une cinétique également linéaire.

Pendant les trois derniers mois, l'épuisement des stocks de matières azotées facilement minéralisables du sol limite les pertes d'azote, suivant une cinétique d'ordre un. L'étude des flux de carbone et d'azote recueillis dans les percolats sous les modèles (A+B) et (A seul) devrait nous permettre de compléter cette analyse.

1.8. MATIERES ORGANIQUES LIXIVIEES

=====

L'analyse des teneurs en carbone et azote des percolats recueillis à la base des modèles, permet d'estimer pour les différentes périodes d'incubation, les flux de matières organiques lixiviées, qui proviennent de la décomposition de la paille de luzerne et des matières organiques préexistantes dans les horizons A et B des modèles.

1.8.1. CARBONE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS

Les flux hebdomadaires moyens de carbone recueillis dans les percolats (annexe 10) diffèrent suivant les doses de paille ajoutées, la période d'incubation, et le type de modèle (A+B ou A seul).

Les pertes de carbone lixivié sont maximum dès les premiers jours pour les modèles (A) sans horizon B. Les flux hebdomadaires moyens décroissent ensuite progressivement pendant les trois premiers mois, et sont très faibles ensuite (fig.11).

Pour les modèles (A+B), les flux de carbone sont très limités pendant les quinze premiers jours. Ils sont beaucoup plus importants que dans les modèles (A seul) au cours des quinze jours suivants. Ils décroissent ensuite au cours du deuxième mois d'incubation, et deviennent faibles au cours du troisième mois et très faibles ensuite.

La présence de l'horizon B retarde donc la lixiviation du carbone en début d'incubation, mais au cours de la deuxième quinzaine l'augmentation brutale des flux de carbone lixivié provoque une compensation, et les flux moyens cumulés du carbone deviennent analogues à partir de la fin du premier mois dans les modèles (A sans B) et (A+B).

En conséquence, les flux moyens cumulés de carbone lixiviés n'augmentent pratiquement pas en fonction des doses de paille ajoutées au cours des quinze premiers jours pour les modèles (A+B). Il existe par contre une relation linéaire entre ces deux paramètres (tabl.19) dès les premiers jours pour les modèles (A sans B).

$$C_L (\text{percolats}) = C_L (0) + \alpha \times C_{P1}$$

A la fin du premier mois, les flux cumulés de carbone lixivié C_L augmentent d'une manière analogue en fonction des doses de carbone apportées dans les modèles (A+B) et (A sans B). Les pentes des droites de régression indiquent que dans les deux types de modèles, le carbone recueilli dans les percolats à la fin du premier mois représente 5 à 6% du carbone apporté par la paille C_{P1} , et 9,6 % à la fin du troisième mois. Pendant les trois mois suivants, les flux cumulés de carbone lixivié n'augmentent pratiquement plus, et le carbone recueilli dans les percolats avoisine au total 10 % du carbone de la paille apportée .

Pour chacune des doses de paille apportées, on constate que les flux cumulés de carbone recueillis dans les percolats sous les modèles (A+B) s'accroissent de plus en plus faiblement en fonction de la durée d'incubation (tabl.19). Les flux de carbone lixiviés s'ajustent assez bien pour le traitement (F1) à une cinétique décroissante du premier ordre :

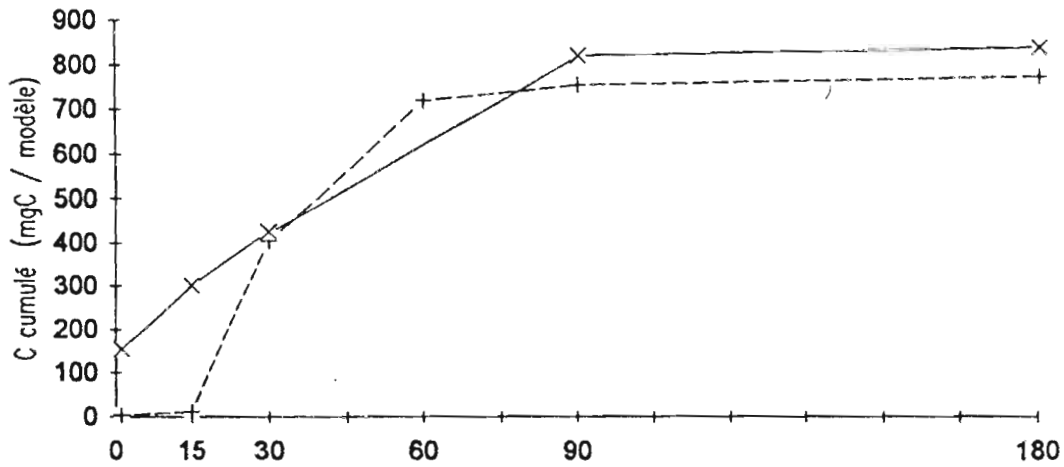
$$C_L = C_{L0} \times (1 - e^{-Kt})$$

Pour les traitements (F2) (F3) et (F4), l'ajustement est bien meilleur si l'on retranche un temps de latence de l'ordre de 15 jours.

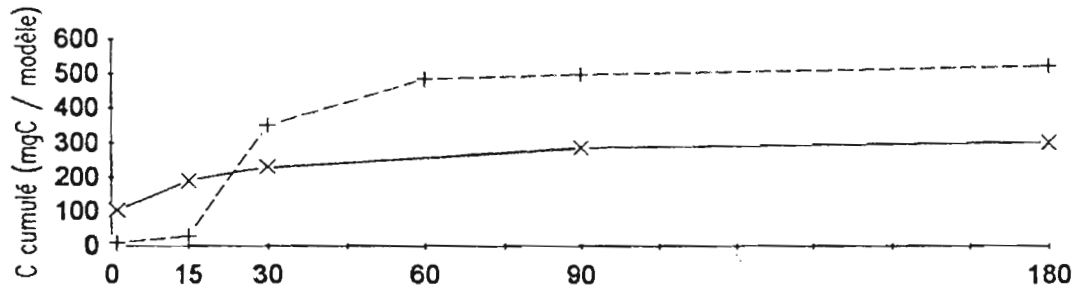
FIGURE 11

CARBONE CUMULE RECUEILLI SOUS LES MODELES

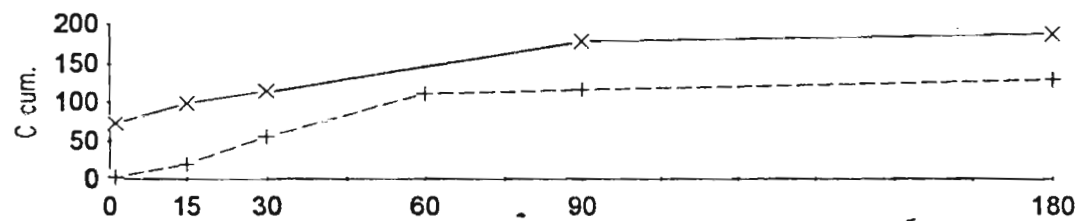
**CARBONE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS
(modèles F4)**



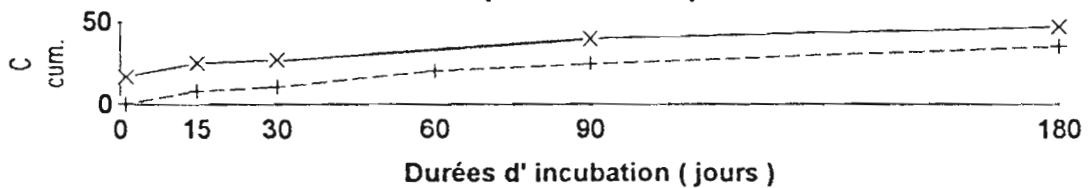
**CARBONE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS
(modèles F3)**



**CARBONE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS
(modèles F2)**



**CARBONE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS
(modèles F1)**



---+--- modèle A+B —x— modèle A

TABLEAU 19

Pertes de Carbone Lixivié (Cl recueilli dans les percolats)
 en fonction du Carbone apporté par la paille (Cpl mg / modèle)
 $Cl(\text{percolat}) = Cl(o) + \alpha * Cpl$

Durées d'incubation (jours)	Cl (f1) sans apport de paille	Cl (o) estimation pour Cpl=0	alpha	R ² Coefficient de détermination
MODELE A				
1	16,79	20,37	0,018	0,99
15	25,09	15,86	0,037	0,99
30	27,08	2,39	0,053	0,97
90	39,89	-36,05	0,098	0,86
180 jours	46,44	-29,54	0,100	0,86
MODELE A+B				
30	9,99	-16,3	0,059	0,90
90	24,45	-26,6	0,097	0,95
180 jours	26,81	-15,8	0,098	0,95

Cinétique d'évolution des pertes de Carbone Lixivié (Cl)
 pour chaque dose de paille en fonction du temps (t jours)
 $Cl = Cl_o * (1 - \exp(-K*(t-15)))$

MODELE	A+B	Cl _o estimation t infini	K (par jour)	T 1/2 Log(2) / K	R ² Coefficient de détermination
Fumures					
F1		36,5	-0,0172	40	0,89
F2		127,2	-0,0406	17	0,97
F3		510,7	-0,0753	9	0,99
F4		731,3	-0,0575	12	0,99

TABLEAU 20

Modèles A+B FLUX DE CARBONE DANS LES MODELES

PERTES MOYENNES DE CARBONE DANS L'HORIZON A (mg,C/colonne)

Durées	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.
Fumures:					
F1 (0mg,C)	0	290	550	830	1140
F2 (2500)	370	1100	1340	2540	3020
F3 (5000)	0	1750	2340	4350	4690
F4 (7500)	1010	1530	3100	5510	6770

GAINS MOYENS DE CARBONE DANS L'HORIZON B (mg,C/colonne)

F1	30	60	30	0	0
F2	80	140	50	10	30
F3	90	220	180	60	70
F4	30	220	230	90	100

FLUX MOYENS CUMULES RECUEILLIS DANS LES PERCOLATS (mg,C)

F1	0	8	10	25	35
F2	2	19	56	116	129
F3	9	27	351	499	525
F4	4	11	404	702	722

Les pertes de carbone par lixiviation des modèles (A+B), sont donc principalement limitées à la période allant du quinzième au soixantième jour; et à partir du troisième mois, les pertes de carbone par lessivage deviennent très faibles pour les deux types de modèles.

Le tableau 20 indique que pour les doses de paille F_3 et F_4 , ces pertes de carbone par lessivage représentent jusqu'à environ 15 % des pertes de carbone observées dans l'ensemble des modèles à la fin du premier mois. Par la suite les pertes par lessivage se stabilisent à environ 11% des pertes.

Pour la dose de paille F_2 et le témoin F_1 , le carbone lessivé représente seulement 4 et 3% des pertes de carbone par l'ensemble des modèles (A+B). Les pertes de carbone par lessivage pour les modèles (A sans B) sont analogues aux pertes des modèles (A+B).

En résumé, les pertes de carbone subies par les modèles (A+B) et (A seul) correspondent essentiellement à un dégagement gazeux sous forme de gaz carbonique. Néanmoins les pertes de carbone par drainage sont relativement importantes en particulier vers la fin du premier mois.

1.8.2. AZOTE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS

Les flux d'azote recueillis dans les percolats (annexe 11) varient d'une manière très différente, qui paraît indépendante des variations des flux de carbone lixivié .

Les quantités d'azote recueillies au cours du ressuyage sont nettement moins importantes dans les modèles (A+B) que dans les modèles (A sans B). Ceci montre que l'horizon B ralentit l'éluviation des formes solubles de l'azote contenues essentiellement dans l'horizon A des modèles.

Par la suite (fig.12), les flux hebdomadaires d'azote lixivié sont à peu près constants tout au long de la période d'incubation pour les modèles (A sans B). Pour les modèles (A+B), les flux hebdomadaires d'azote lixivié sont d'abord très faibles au cours du premier mois. Ils s'accroissent ensuite progressivement, et sont maximum en fin d'expérience.

L'horizon B des modèles provoque donc une réduction importante des pertes d'azote par lixiviation au cours du ressuyage et des deux premiers mois. Ceci est à mettre en relation avec l'illuviation de composés azotés et en particulier la fixation d'ammonium dans l'horizon B des modèles au cours des premiers mois. Par contre au cours des trois derniers mois, l'accumulation d'azote dans l'horizon B des modèles cesse et une partie de l'azote stocké temporairement dans cet horizon disparaît. Ceci explique que les flux hebdomadaires d'azote recueillis dans les percolats sont alors maximum.

Pour chaque période d'incubation, les flux moyens cumulés d'azote lixivié sont proportionnels à l'azote apporté par la paille (tabl.21);

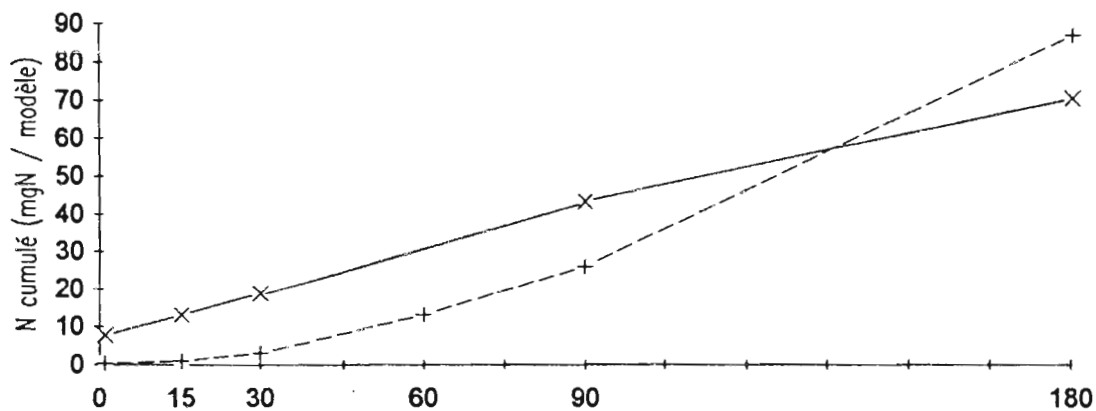
$$(N_L \text{ percolats}) = N_L \langle \infty \rangle + \beta \times N_{P1}$$

mais pour le modèle (A+B), l'azote lixivié durant les trois premiers mois ne représente que 3% de l'azote apporté par la paille. En fin d'expérience, l'azote recueilli dans les percolats est égal à 11,6 % de l'azote apporté dans ces modèles.

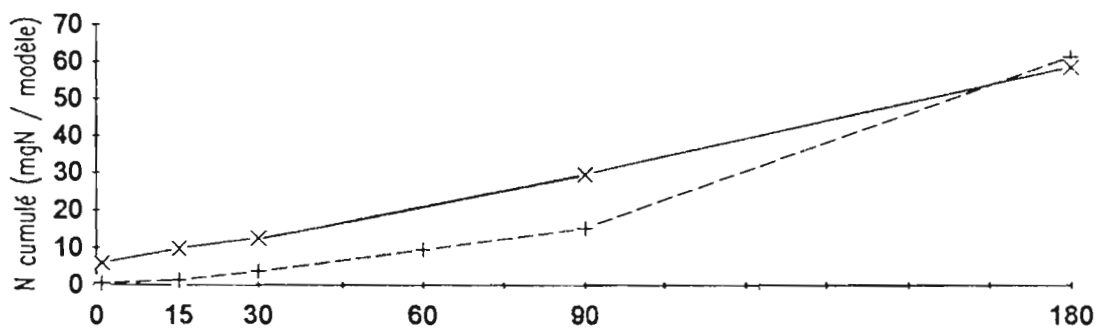
FIGURE 12

AZOTE CUMULE RECUEILLI SOUS LES MODELES

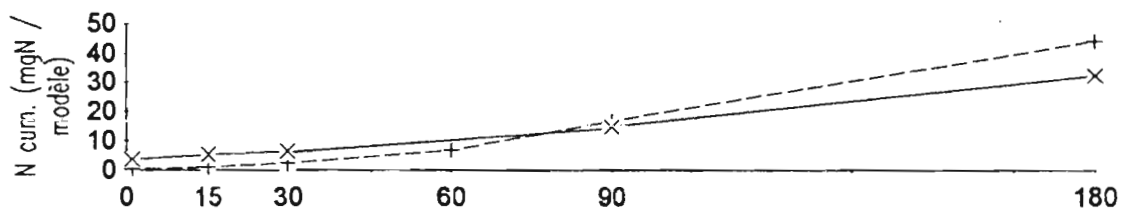
**AZOTE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS
(modèles F4)**



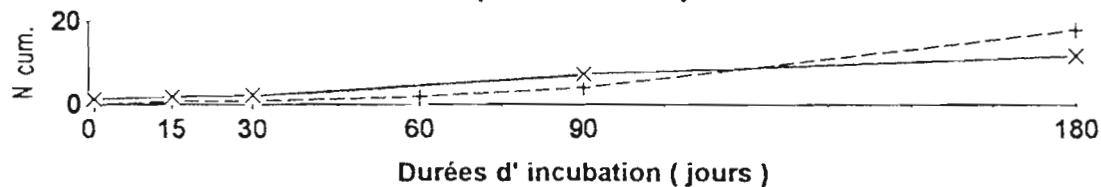
**AZOTE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS
(modèles F3)**



**AZOTE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS
(modèles F2)**



**AZOTE RECUEILLI DANS LES PERCOLATS
(modèles F1)**



---+--- modèle A+B —x— modèle A

TABLEAU 21

Pertes d'AZOTE Lixivié (Nl recueilli dans les percolats)
 en fonction de l' AZOTE apporté par la paille (Npl mg / modèle)

$$Nl(\text{percolat}) = Nl(o) + \text{b\^e}ta * Npl$$

Durées d'incubation (jours)	Nl (f1) sans apport de paille	Nl (o) estimation pour Npl=0	b\^e}ta	R^2 Coefficient de détermination

MODELE A				
1	1,25	1,39	0,011	0,997
15	1,83	1,66	0,020	0,996
30	2,22	1,49	0,029	0,989
90	7,31	5,30	0,064	0,982
180 jours	11,89	13,07	0,105	0,980

MODELE A+B				
30	0,87	1,26	0,004	0,725
90	3,99	5,79	0,033	0,853
180 jours	18,06	19,01	0,116	0,995
=====				

Cinétique d'évolution des pertes d'Azote Lixivié (Nl)
 pour chaque dose de paille, en fonction du temps (t jours)
 dans les modèles A ;
$$Nl(\text{percolats}) = Nl(o) + \text{gamma} * t$$

MODELES A	Nl(o) estimation pour t=0	gamma	R^2 Coefficient de détermination

Fumures			
F1	0,973	0,062	0,987
F2	2,267	0,161	0,986
F3	4,527	0,297	0,997
F4	8,485	0,352	0,995

Cinétique d'évolution des pertes d'Azote Lixivié (Nl)
 pour chaque dose de paille, en fonction du temps (t jours)
 dans les modèles A+B ;
$$Nl = Nl(o) + G(1) * t + G(2) * t^2$$

MODELES A+B	Nl(o) estimation pour t=0	gamma(1)	gamma(2)	R^2 Coefficient de détermination

Fumures				
F1	0,47	-0,013	0,00062	0,988
F2	-0,40	0,062	0,00104	0,985
F3	0,94	0,012	0,00180	0,998
F4	-0,55	0,092	0,00220	0,999

TABLEAU 22

Modèles A+B FLUX D'AZOTE DANS LES MODELES

PERTES MOYENNES D'AZOTE DANS L'HORIZON A (mg,N/colonne)

Durées:	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.
F1 (0 mgN)	38	43	65	103	113
F2 (193mg)	94	90	95	176	222
F3 (386mg)	92	91	135	215	337
F4 (579mg)	140	115	172	343	473

GAINS MOYENS OU PERTES (-) D'AZOTE DANS L'HORIZON B (mgN)

F1	-8	-2	0	0	-6
F2	-6	3	7	13	6
F3	-8	7	25	43	21
F4	-6	6	33	55	24

FLUX MOYENS CUMULES RECUEILLIS DANS LES PERCOLATS (mg,N)

F1	0,03	0,77	0,87	3,99	18,06
F2	0,32	1,04	2,25	16,65	44,07
F3	0,47	1,31	3,56	15,17	61,52
F4	0,33	1,07	2,99	25,90	87,07

Pour les modèles (A sans B), les pertes d'azote lixivié augmentent plus fortement en fonction des doses de paille ajoutées, pendant les trois premiers mois. Toutefois en fin d'expérience, l'azote lixivié est légèrement plus faible que pour les modèles A+B. Il représente 10,5% de l'azote apporté par la paille.

Pour chaque dose de paille apportée dans les modèles (A sans B), les flux d'azote cumulés recueillis dans les percolats s'ajustent étroitement à une fonction linéaire du temps d'incubation (tabl.25):

$$N_L = N_{L_0} + \gamma \times t$$

On constate que la pente " γ " s'accroît proportionnellement aux doses de paille ajoutées pour F_2 et F_3 , et un peu plus faiblement pour F_4 .

Dans les percolats recueillis sous les modèles (A+B), les flux d'azote cumulés pour chaque dose de paille ajoutée s'accroissent progressivement en fonction du temps d'incubation. Le tabl.21 indique que l'azote lixivié peut être ajusté à un polynôme du deuxième degré:

$$N_L = N_{L_0} + \gamma_1 \times t + \gamma_2 \times t^2$$

dont le paramètre γ_2 est positif et s'accroît en fonction de la dose de paille ajoutée.

La comparaison des cinétiques de lixiviation de l'azote dans les deux types de modèles (A) et (A+B) montre que les quantités cumulées d'azote lixivié sont identiques vers le quatrième ou le cinquième mois. En fin d'expérience les pertes d'azote par lixiviation deviennent plus importantes dans les modèles (A+B) que dans les modèles (A) sans horizon B.

La comparaison des quantités d'azote recueillies dans les percolats avec la diminution des stocks d'azote dans l'ensemble des modèles montre que l'azote lixivié représente un faible pourcentage des pertes d'azote au cours de deux premiers mois. Par la suite le pourcentage d'azote lixivié s'accroît de plus en plus; et en fin d'expérience, il représente près de 20% de l'azote perdu par l'ensemble des modèles (A+B) et environ 18% pour les modèles (A sans B).

RAPPORT C/N DES PERTES

Le rapport C/N de l'ensemble des pertes est pour les trois doses de paille de l'ordre de 14,7 c'est à dire analogue au rapport C/N de la paille de luzerne calibrée qui a été ajoutée. Par contre, les rapports C/N des pertes par lixiviation sont nettement plus faibles et passent de 3 à 8,5 et à 12 respectivement pour les trois doses de paille ajoutées (F_2 , F_3 et F_4). Ceci paraît dû au fait que les pourcentages des pertes de carbone lixiviées par rapport aux pertes totales sont d'autant plus faibles que les doses de paille ajoutées sont moins importantes.

En résumé, les pertes par lixiviation sont relativement plus importantes pour l'azote que pour le carbone. Les flux de ces deux éléments ont des cinétiques différentes, sans aucun synchronisme.

La cinétique d'ordre zéro des pertes d'azote provenant du sol pendant les trois premiers mois, et le stockage transitoire d'une partie de l'azote ammonifié (sous forme échangeable ou fixée) explique que les pertes d'azote par lixiviation ont également une cinétique d'ordre zéro durant les six mois d'incubation pour les modèles (A) et sont ajustables à une fonction parabolique (polynôme du deuxième degré) pour les modèles (A+B).

Les pertes de carbone par lixiviation ont lieu au cours des trois premiers mois. Elles sont donc peu décalées dans le temps par rapport aux autres pertes de carbone (sous forme gazeuses), et l'illuviation transitoire qui est observée dans l'horizon B, ne provoque pas un accroissement sensible du carbone lixivié au delà du troisième mois.

1.9. CONCLUSIONS SUR L' EVOLUTION DES MATIERES ORGANIQUES

=====

Il existe un effet d'incitation de la paille de luzerne apportée, sur la décomposition des matières organiques du sol de l' horizon A des modèles; mais cette accélération de leur évolution se fait surtout sentir au cours des premiers jours d'incubation, et elle ne s'accroît pas en fonction des doses de paille ajoutées. Cet effet d'incitation est relativement plus important et plus prolongé pour les matières organiques préexistant dans le sol, qui sont contenues dans la fraction granulométrique grossière (0,2 à 2mm), ainsi que pour les matières organiques non extractibles (Matières organiques légères et Humine). Il est par contre très faible pour les matières humiques extractibles et pour les polysaccharides. Au total, cet effet d'incitation dû à l'apport de paille, provoque en début d'expérience des pertes de carbone et surtout d'azote provenant du sol, qui sont nettement plus importantes que sans apport de paille.

Nous avons appelé I_{C_0} et I_{N_0} ces pertes de carbone et d'azote provenant du sol, au cours du ressuyage et par suite de la décomposition provoquée par l'humectation ("flush"), ainsi que par cet effet d'incitation. Si l'on retranche I_{C_0} du stock (C_0) de carbone initial du sol placé dans l'horizon A des modèles, on constate que le stock de carbone restant dans l'horizon A des modèles à l'instant "t", peut être évalué simplement en fonction du carbone restant, qui provient du sol (C_{r_s}) et qui provient de la paille de luzerne ajoutée (C_{r_p}):

$$C_t \text{ restant} = C_{r_s} + C_{r_p} = (C_0 - I_{C_0}) \times e^{-K_{C_s} \times t} + \alpha \times C_{p1} \times e^{-K_{C_p} \times t}$$

Les deux compartiments s'ajustent à des cinétiques du premier ordre. La constante de décomposition journalière du carbone du sol (K_{C_s}) est dix fois plus faible que celle de la paille (K_{C_p}), c'est à dire que la demi-vie du carbone organique du sol est dix fois plus importante que celle du carbone qui provient de la paille. La constante de décomposition journalière de l'azote provenant du sol est analogue à celle du carbone ($K_{N_s} \approx K_{C_s}$); par contre la constante de décomposition journalière de l'azote de la paille est inférieure de 50% à celle du carbone ($K_{C_p} \approx 1,5 \times K_{N_p}$), et sa demi-vie d'autant plus longue.

Le deuxième terme de cette formule permet donc d'estimer à chaque instant le carbone restant qui provient de la décomposition de la paille de luzerne ajoutée. Le paramètre α représente la fraction du carbone de la paille de luzerne qui est potentiellement décomposable suivant une cinétique du premier ordre, soit environ 80% du carbone de la paille ajoutée.

Pour l'azote, le paramètre β est proche de l'unité, c'est à dire que tout l'azote de la paille de luzerne est potentiellement minéralisable et vient abonder ce compartiment des matières azotées labile de l'horizon A. La valeur élevée de β , associée à une vitesse de décomposition, volatilisation et/ou lessivage relativement lente des composés azotés expliquent la baisse progressive du rapport C/N de l'horizon A dans les modèles enrichis en paille de luzerne.

L'enrichissement net en carbone et azote de l'horizon B des modèles est plus modeste, transitoire et plus tardif pour N que pour C. Le carbone organique temporairement illuvié dans l'horizon B correspond

essentiellement à une humine d'insolubilisation. Une partie importante de l'azote est illuviée dans l'horizon B sous forme d'ammonium échangeable et fixé.

Les pertes de carbone par lixiviation des modèles (A+B) sont surtout importantes pendant les deux premiers mois. Elles arrivent à représenter jusqu'à 11% des pertes totales de carbone par les modèles.

Les flux d'azote lixiviés dans les modèles (A+B) sont plus modestes pendant les premiers mois, puis ils augmentent progressivement. Au total les pertes par lixiviation sont relativement plus importantes, par rapport aux pertes totales, pour l'azote que pour le carbone.

Néanmoins nous verrons dans la deuxième partie de cette publication, le rôle important que paraît jouer la lixiviation des matières organiques dans les modèles, en particulier sur la modification de la garniture cationique des horizons A et B, sur la désaturation du complexe adsorbant de l'horizon B des modèles, ainsi que sur le transfert de sesquioxydes vers la fin du premier mois d'incubation.

2ème Partie

```
+++++  
+  
+ EVOLUTION DU COMPLEXE D' ECHANGE CATIONIQUE +  
+  
+++++
```


Les relations qui existent entre la capacité d'échange cationique (CEC) des sols et leurs teneurs en matière organique ont été mises en évidence par l'analyse des régressions simples ou multiples en fonction des teneurs en carbone, des teneurs en argile et du pH. Toutefois le défaut de normalité des données analytiques qui sont utilisées pour le calcul, indique le plus souvent que les échantillons de sols appartiennent à des populations hétérogènes; dès lors la méthode statistique d'évaluation de la CEC des matières organiques manque de rigueur. Sur les lots d'échantillons plus homogènes, correspondant au même horizon, de sols de même type, la recherche de corrélations donne des résultats moins significatifs et des évaluations de la CEC des matières organiques beaucoup moins précises (DRAKE et al 1982).

Les mesures de la CEC des matières organiques par différence - avant et après extraction ou destruction des matières organiques - ont permis de confirmer certaines évaluations (BOISSEZON 1970 et 1977). Toutefois ces méthodes indirectes ne sont pas exhaustives. Par exemple le traitement par l'eau oxygénée ne détruit pas toutes les matières organiques; de plus, il risque de modifier la CEC des matières organiques résiduelles, de démasquer des sites d'échange initialement bloqués dans des complexes organo-métalliques (PRATT 1957) et/ou de modifier la CEC des matières minérales.

Les méthodes expérimentales étudient les variations dans le temps de la CEC et du stock de matière organique dans un sol cultivé. Elles permettent d'évaluer les modifications de la capacité d'échange, qui sont liées à un changement des restitutions végétales et aux pratiques culturales. Par exemple, l'étude de l'influence du défrichement et du travail des sols cultivés sur leurs caractéristiques montre les relations étroites qui existent entre la diminution du stock organique et de la CEC, particulièrement dans les sols tropicaux (FAUCK et al 1969).

Inversement, l'incorporation d'amendements organiques ne provoque pas toujours une augmentation significative de la capacité d'échange des sols des parcelles enrichies, par exemple avec du fumier (BOISSEZON et al. 1986) ou avec des copeaux de bois et du lizier de porc (NDAYE GAMIYE et DUBE 1986), bien que dans les deux cas les teneurs en matières organiques des sols aient été significativement accrues. L'hétérogénéité initiale du champ d'expérience, les irrégularités de l'enfouissement des matières organiques dans le profil cultural, la remontée par le labour de terre moins humifère, mais plus argileuse de profondeur, peuvent expliquer l'absence d'effet significatif sur la capacité d'échange. Toutefois lorsque l'apport de résidus végétaux ou de fumier est suffisamment massif ou répété, on observe une augmentation significative de la CEC (N'DAYEGAMIYE 1990, LAX 1991). GODEFROY (1974) a constaté que la capacité d'échange de sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire dépend du type de résidus végétaux apporté (bananier ou ananas), tandis que DELAS (1971) observe sur un sol sablo-caillouteux du Bordelais, et PRATT (1957) sur un sol limono-sableux de Californie, que l'augmentation de la capacité d'échange ne paraît pas dépendre du type d'amendement organique apporté.

On sait que les résidus végétaux, composts et fumiers possèdent une certaine capacité d'échange qui a d'abord été imputée principalement à

la lignine, (Mc GEORGE 1931-1934) et aux produits de sa transformation dénommés humo-lignine. Mais depuis, l'étude des produits de l'oxydation des substances préhumiques contenues dans les débris végétaux et des substances humiques formées ont montré la diversité des composés organiques porteurs de groupements carboxyliques et d'hydroxyles phénoliques, qui confèrent à ces amendements organiques une certaine capacité d'échange cationique et un certain pouvoir complexant en particulier vis à vis des cations polyvalents. Toutefois la CEC des engrais verts, des composts et fumiers croît avec le temps d'incubation, et la mesure de leur capacité d'échange est même parfois utilisée pour apprécier le degré de maturation des composts (HARADA et INOKO 1980).

Lorsque les pailles, composts ou fumiers sont enfouis dans le sol, les débris végétaux se fragmentent sous l'influence de la faune du sol et de la microflore. Une partie importante se minéralise plus ou moins rapidement en fonction de l'équilibre des facteurs trophiques et des conditions pédo-climatiques. Le reste s'humifie c'est à dire donne naissance à des composés organiques d'origine résiduelle ou d'origine microbienne, qui peuvent se polymériser, former des granules ou se fixer sur les matières minérales du sol dans des complexes organo-minéraux relativement stables.

La minéralisation des amendements organiques enfouis dans le sol devrait donc entraîner une diminution relativement rapide de la capacité d'échange totale du mélange sol-amendement au cours des premiers mois; mais inversement, on peut s'interroger sur l'influence de la fraction organique humifiée sur la CEC du sol. C'est cette fraction relativement stable qui peut augmenter durablement le pouvoir absorbant du compost ou du sol amendé.

Au delà du suivi de l'évolution du complexe d'échange cationique dans l' horizon A des modèles de laboratoire, enrichis par différentes doses de paille de luzerne; le but de cette étude est d'évaluer la capacité d'échange des matières organiques résiduelles ou stabilisées, qui proviennent de la transformation de la paille de luzerne ajoutée.

Le deuxième objectif est d'étudier le devenir des cations apportés par la paille de luzerne et l'influence de ces apports de matière organique et du régime percolatif hebdomadaire sur l'évolution du pH, de la saturation du complexe absorbant des horizons A et B des modèles, la fixation sous forme non-échangeable ou inversement l'éluviation de cations du sol, et tenter d'établir un bilan de la lixiviation des différents cations dans et hors des modèles.

2.1. MATERIELS ET METHODES

=====

LE SOL

Rappelons que le sol utilisé pour réaliser ces modèles de laboratoire est un sol brun forestier, faiblement lessivé, (ou Brunisol luviq (A.F.E.S. 1992) développé sur Limon des plateaux du Bassin Parisien (Grignon). Les caractéristiques des horizons A₁ et B₂ de ce sol sont résumées dans le tableau 1.

L'analyse par diffractométrie X montre que la fraction inférieure à 2 µm est constituée à parts à peu près égales par trois constituants argileux: smectite, illite ouverte et kaolinite. Cette fraction fine du sol contient également du quartz très fin, et des traces de minéraux interstratifiés (de nature chloritique), de feldspaths potassique (orthose) et de la goethite (P.Quantin et G.Millot Communication personnelle). Nous verrons que la capacité d'échange cationique des matières minérales de ce sol est de l'ordre de 20 cmol(+) Kg⁻¹.

Les surfaces spécifiques totales des horizons A₁ et B₂ mesurées par l'EGME sont respectivement de 33 et 52 m² g⁻¹.

METHODES D'ANALYSES

La mesure de la capacité d'échange cationique à pH:7 a été réalisée par une méthode originale conçue pour mesurer à la fois, la CEC des matières végétales et du sol, ainsi que des mélanges de ces deux constituants et des complexes organo-minéraux formés au cours de l'incubation. Nous avons donc évité d'utiliser l'acétate d'ammonium neutre qui forme avec certaines matières organiques des complexes ammoniaqués solubles dans l'alcool qui sert au lavage. Nous avons aussi évité les micro-méthodes, qui nécessitent un broyage préalable pour obtenir des micro-échantillons représentatifs, ce qui modifie les surfaces actives des agrégats, des débris végétaux et des complexes organo-minéraux. Nous avons enfin utilisé le calcium pour saturer le complexe d'échange afin d'éviter autant que possible les pertes de matières organiques hydrosolubles, et la dispersion des argiles au cours du rinçage.

Dix grammes de l'échantillon (inférieurs à 2mm) sont placés dans un bécher de 100 ml avec environ 50 ml d'une solution de CaCl₂, M tamponné à pH:7 par la triéthanolamine. Le sol, agité périodiquement avec une baguette, reste au contact pendant une dizaine de minutes. Après décantation, le surnageant est filtré. L'opération est renouvelée autant de fois que nécessaire pour que le volume total de solution de saturation soit égal à 500ml.

Le rinçage de l'échantillon de sol est réalisé de la même manière avec 500ml de CaCl₂, M/50. Le sol est transvasé sur le filtre à la faveur des deux derniers rinçages.

Le sol et le filtre, sont laissés s'égoutter pendant une nuit. Ils sont à nouveau placés dans le bécher. On ajoute environ 50 ml d'une solution KNO₃ M, et après avoir dilacéré le papier filtre, le sol est agité avec une baguette. Après décantation, le surnageant est filtré sur une fiole jaugée d'un litre. Pour éviter que le filtre ne se colmate les particules de terre qui passent sur le filtre sont rassemblées au fond par un jet de la solution de KNO₃. L'opération est répétée comme précédemment jusqu'à 1000ml.

Le dosage de Ca^{++} est réalisé à l'autoanalyseur par la crésolphtaléine complexon à pH: 10,5 ou au spectromètre d'absorption atomique après dilution avec de l'eau. Le chlore restant est également dosé à l'autoanalyseur par le thiocyanate mercurique en présence d'alun de fer (Pelloux et al 1971). On peut ainsi estimer les traces de CaCl_2 présent dans le sol à la fin du rinçage et du ressuyage. La capacité d'échange est égale à la quantité d'ions Ca^{++} recueillis dans la solution de nitrate, après avoir retranché la faible quantité d'ions Ca^{++} sous forme de CaCl_2 restant dans la phase interstitielle du sol après rinçage. Les résultats sont exprimés en $\text{cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$ (ou $\text{me}/100\text{g}$) de sol.

Les cations échangeables sont extraits à pH: 7 par l'acétate d'ammonium *M* et dosé au spectromètre d'absorption atomique. L'ammonium échangeable est extrait par KCl *M* et dosé à l'autoanalyseur par la réaction de Bertholet au bleu d'indophenol.

L'ammonium fixé (rétrogradé ou non-échangeable) est dosé par la méthode décrite par KEENEY et NELSON (1982). Après oxydation de l'azote organique par l'hypobromite de potassium en milieu alcalin, l'ammonium échangeable est éliminé par des lavages du résidu par KCl . NH_4 fixé est libéré par attaque des silicates argileux par HCl-HF , et distillé par entraînement à la vapeur en présence de potasse. L'ammoniac recueilli dans l'acide borique est titré par H_2SO_4 , *N/20*.

Analyse des cations contenus dans les percolats: Les percolats rassemblés par période d'incubation ont été conservés au réfrigérateur avec du chlorure mercurique jusqu'à analyse. Sur une partie aliquote des percolats, nous avons minéralisé les matières organique par l'eau oxygénée, amené à sec et remis en solution dans HCl dilué. Fe, Al, Ca, Mg, K et Na ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique.

Les extractions du fer et de l'aluminium dits "libres" ont été réalisées par les méthodes décrites par JEANROY (1983): par l'oxalate d'ammonium (pH: 3) et au tétraborate de potassium (pH: 10), et dosage de Al et Fe par absorption atomique.

La mesure de la CEC du sol après extraction d'Al et Fe par l'une ou l'autre de ces méthodes, nécessite l'élimination des traces du réactif d'extraction par rinçage avec une solution de K_2SO_4 pour éviter la dispersion de la fraction argileuse. Comme nous le verrons (§:2.2.3), ce traitement par K_2SO_4 provoque une fixation (rétrogradation) d'ions K^+ , qui réduit d'une manière très nette les charges permanentes dues à des substitutions dans les argiles 2:1 de ce sol.

2.2. CAPACITE D' ECHANGE CATIONIQUE DES MODELES

=====

2.2.1 CAPACITE D' ECHANGE CATIONIQUE DE L' HORIZON "A"

Comme on pouvait le supposer, la CEC de l'horizon A des modèles augmente en fonction des doses de paille de luzerne ajoutées. Toutefois dès les premiers jours, la CEC de l'horizon A des modèles est inférieure à la somme des capacités d'échange d'une part de la paille (57 cmol(+) kg⁻¹ ou me/100g de paille, soit 142 cmol(+) kg⁻¹ de carbone), et d'autre part du sol placé dans l'horizon A des modèles (19,84 cmol(+) kg⁻¹).

Par ailleurs la CEC de l'horizon A diminue avec le temps d'incubation, même pour les modèles (F₁) non-enrichis en paille (fig.13). Le dispositif expérimental permet d'analyser l'influence de ces deux facteurs - doses de paille ajoutées et temps d'incubation - sur l'évolution simultanée de la CEC et des teneurs en carbone résiduel dans cet horizon des modèles.

RELATION ENTRE LA CEC ET LA TENEUR EN CARBONE

On constate que pour l'ensemble des données (annexe 13), ces deux paramètres sont significativement corrélés (tabl.23). L'équation de régression linéaire:

$$CEC = a + b \times C$$

indique que la CEC liée aux matières organiques est égale en moyenne à: "b×10³" = 125 cmol(+) kg⁻¹ de carbone, et celle des matières minérales:

"a" = 16,5 cmol(+) kg⁻¹ de sol. Cependant le coefficient de détermination, quoique très hautement significatif, n'est que de R²=0,85.

Pour chaque durée d'incubation, il existe une corrélation significative entre les capacités d'échange et les teneurs en carbone restant dans l'horizon A des différents modèles. La capacité d'échange moyenne des matières organiques restantes "b" s'accroît considérablement avec le temps d'incubation, mais le coefficient de détermination devient médiocre à partir du troisième mois.

Les régressions linéaires, pour chaque dose de paille ajoutée, sont très hautement significatives pour les doses les plus fortes (F₃) et (F₄), à peine significatives dans les témoins (F₁) et pour l'apport de paille le plus faible (F₂). La capacité d'échange moyenne "b", qui est liée aux teneurs en carbone total restant dans l'horizon A, décroît fortement lorsque les doses de paille ajoutées s'accroissent.

Au total, la capacité d'échange des matières organiques provenant de la paille serait plus faible que celle des matières organiques provenant du sol placé dans l'horizon A des modèles. Néanmoins, la CEC des matières organiques qui proviennent de la paille paraît augmenter avec le temps d'incubation. Il reste à confirmer ces résultats.

EFFET APPARENT DE L' APPORT DE PAILLE SUR LA CEC de l' HORIZON A

Pour chaque durée d'incubation, nous pouvons calculer l'effet apparent de l'apport de différentes doses de paille sur la capacité

CAPACITE D' ECHANGE CATIONIQUE
de l' horizon A des modèles

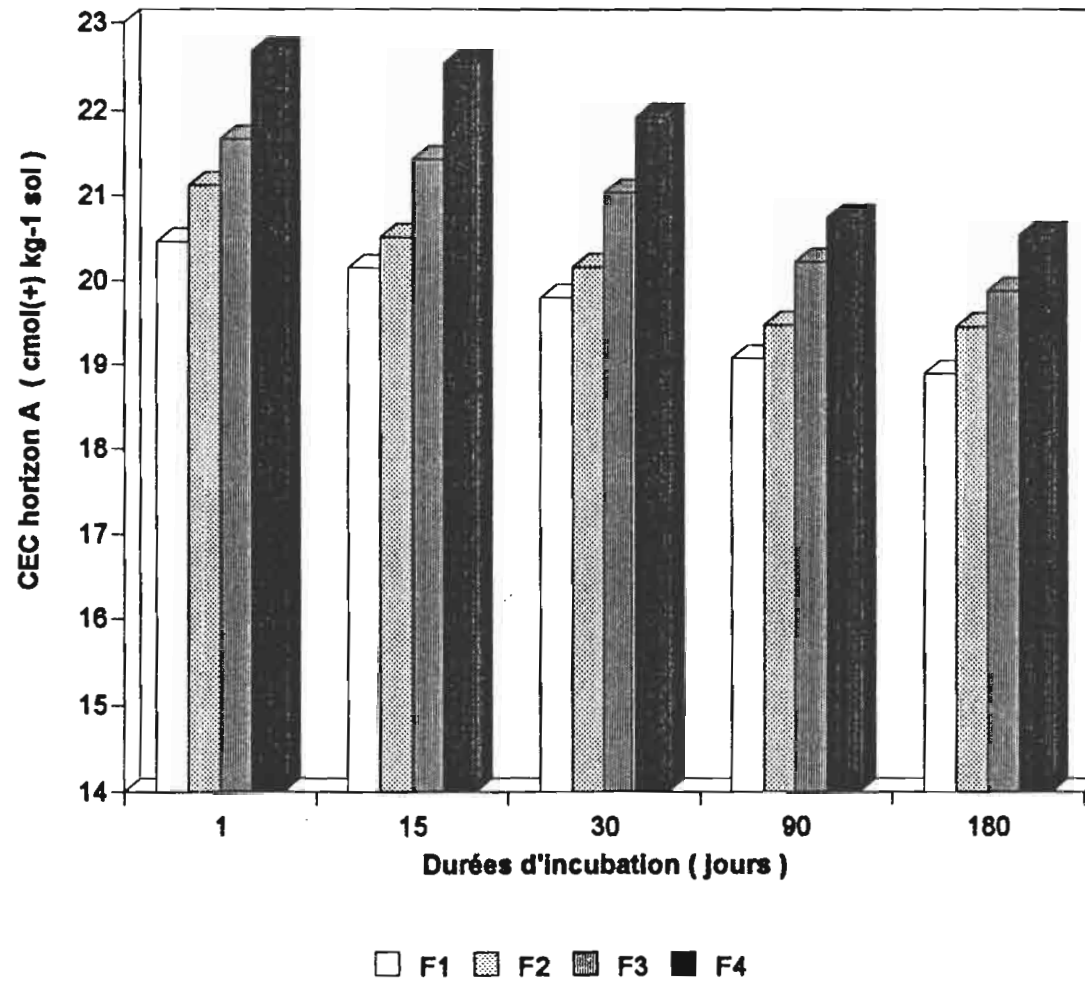


FIGURE 13

TABLEAU 23

Modèle A+B RELATIONS ENTRE LA CAPACITE D'ECHANGE
ET LA TENEUR EN CARBONE DE L'HORIZON A

$$C.E.C. = a + b \cdot C$$

Tableau 1 Régression linéaire pour l'ensemble des données

a	b*1000	Coéf. de Détermination R ²	Signification
16,52	124,5	0,848	***

Tableau 2 Régressions linéaires pour chaque dose de paille ajoutée

Doses de paille ajoutées (en % de mat. sèches)	a	b*1000	Coéf. de Détermination R ²	Signification
F1 (0 %)	11,13	345,6	0,566	*
F2 (2,5%)	15,19	165,9	0,723	**
F3 (5 %)	16,97	109,5	0,885	***
F4 (7,5%)	17,14	111,3	0,937	***

Tableau 3 Régressions linéaires au cours de l'incubation

Durées d'incubation	a	b*1000	Coéf. de Détermination R ²	Signification
1 jours	17,99	89,3	0,928	***
15 -	17,15	110,8	0,892	***
30 -	16,61	122,2	0,850	***
90 -	15,26	162,8	0,755	**
180 -	13,92	221,1	0,594	*

* ; significatif (p<0,05), ** ; haut.significatif (p<0,01)

*** ; très haut.significatif (p<0,001)

C.E.C. : Capacité d' Echange Cationique de l' horizon A des modèles exprimée en cmol(+) kg⁻¹ ou me/100g de sol.

C : teneur en carbone de l'horizon A exprimé en pour mille ou g de carbone par Kg de sol (gC kg⁻¹ sol)

b : CEC des matières organiques restantes exprimé en cmol(+) g⁻¹ C donc b*1000 est exprimé en me/100g de Carbone

TABLEAU 24

Modèle A+B	Effets de l'apport de paille sur la Capacité d'Echange de l'horizon A du modèle						Modèle A
Durées	(initiale)	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	180ème J.

Fumures	Variations de la C.E.C. (Tx-T1) en cmol Kg ⁻¹						
F2 (T2-T1)	(1,39)	0,67	0,36	0,36	0,40	0,56	0,32
F3 (T3-T1)	(2,71)	1,22	1,29	1,24	1,13	0,98	0,93
F4 (T4-T1)	(3,98)	2,21	2,38	2,12	1,65	1,63	1,20
Moy.pondérées	(1,39)	0,68	0,67	0,62	0,53	0,53	0,41

Variations de la teneur en Carbone (Cx-C1) p.mille							
F2 (C2-C1)	(9,10)	7,76	6,22	6,30	2,96	2,34	2,87
F3 (C3-C1)	(17,77)	17,72	12,76	11,64	5,48	5,39	5,27
F4 (C4-C1)	(25,99)	22,70	21,98	17,63	10,28	6,92	7,51
Moy.pondérées	(9,10)	8,03	6,83	5,93	3,12	2,44	2,61

C.E.C. des matières organiques provenant de la paille							
(Tx-T1)/(Cx-C1) en cmol Kg ⁻¹ C							
F2	(153)	86,34	57,88	57,14	135,14	239,32	111,50
F3	(153)	68,85	101,10	106,53	206,20	181,82	176,47
F4	(153)	97,36	108,28	120,25	160,51	235,55	159,79
Moyennes	(153)	84,18	89,09	94,64	167,28	218,89	149,25

N.B. L'évaluation de la C.E.C. des matières organiques provenant de la paille ajoutée est estimée en supposant l'additivité des C.E.C. avec celle des mat. orga. préexistantes et l'absence d'effet de l'apport de paille sur la cinétique de décomposition des mat.orga. préexistantes dans le soi.

TABLEAU 25

Modèle A+B Relation entre la Capacité d'Echange Cationique (CEC)
 ----- et le Carbone restant dans l'horizon A provenant de la paille C(rp)

$$CEC = a + b * C(rp)$$

Durée:	CEC (F1)	- a -	In	b * 1000	R ²
1er jour	20,45	20,22	0,23	100	0,968
15ème j.	20,14	19,38	0,76	143	0,996
30ème j.	19,79	19,20	0,59	155	0,999
90ème j.	19,07	18,82	0,25	193	0,994
180ème j.	18,88	18,82	0,06	229	0,980

a est la CEC calculée sans apport de paille, CEC (F1) est la valeur mesurée pour un apport de paille nul. Ces valeurs sont exprimées en cmol(+) kg⁻¹ ou me/100g de sol.

In : Interaction = CEC(F1) - a exprimé en cmol(+) kg⁻¹ de sol

b : CEC des matières organiques restantes qui proviennent de la paille en cmol(+) g⁻¹ de Carbone, donc b*1000 est exprimé en cmol(+) kg⁻¹ de C

C(rp) : Carbone restant provenant de la paille, calculé pour chaque durée d'incubation a partir de la régression linéaire fonction des doses de carbone de la paille ajoutée exprimées en gC kg⁻¹ de sol

Modèle A+B Cinétique d'évolution de la CECpp dans l'horizon A
 ----- des m.o. provenant de la paille (cmol(+) / kg sol)
 $CEC_{pp} = CEC_0 * \exp(-k*t)$ (15 < t < 180 jours)

FUMURES	CECp de la paille	CECo (t=0)	- k -	T 1/2	Coef, R ² de détermination
F2	1,40	0,82	0,00240	289	0,85
F3	2,71	1,56	0,00223	311	0,88
F4	3,98	2,33	0,00238	292	0,85

CEC_{pp} : Capacité d'échange des m.o. provenant de la paille ajoutée

CEC₀ : Valeur de CEC_{pp} pour t=0

CEC_p : Capacité d'échange de la paille ajoutée

d'échange (T) de l'horizon A, en retranchant la capacité d'échange (T₁) des modèles sans apport de paille, pour la même durée d'incubation. On constate (tabl.24) qu'après une baisse très rapide par rapport à la capacité d'échange initiale de la paille, les valeurs de la CEC dues à l'enfouissement de paille restent à peu près constantes. (T₂-T₁) est voisin de 0,5, (T₃-T₁) de 1,2 et (T₄-T₁) autour de 2 cmol(+) kg⁻¹ de sol.

En divisant pour chaque durée d'incubation, cette CEC due à l'apport de paille, par l'accroissement des teneurs en carbone (C₂-C₁), (C₃-C₁) et (C₄-C₁), on constate que la capacité d'échange apparente de la paille ajoutée (T_x-T₁) / (C_x-C₁) s'accroît nettement au cours de la période d'incubation, en moyenne de 84 à 219 cmol(+) kg⁻¹ (ou me/100g) de carbone.

Ces estimations de la capacité d'échange des matières organiques provenant de la paille de luzerne ajoutée ont été réalisées en supposant l'additivité des CEC des matières organiques du sol, avec celles des matières organiques qui proviennent de la décomposition de la paille. Elles supposent également l'absence d'effet des apports de paille sur la cinétique de décomposition des matières organiques préexistantes dans le sol placé dans l'horizon A des modèles. Nous avons vu que cette deuxième hypothèse n'est pas toujours vérifiée. En particulier, il existe un effet d'incitation ou "priming ratio", qui diffère significativement de un, au cours du premier mois d'incubation. Pour pallier cette difficulté, nous avons donc recherché s'il existe pour chaque durée d'incubation, une relation directe entre la CEC de l'horizon A et le carbone, qui provient de la paille.

RELATION ENTRE LA CEC ET LE CARBONE RESTANT QUI PROVIENT DE LA PAILLE

Nous avons vu dans la première partie de cet exposé, que pour chaque durée d'incubation, la teneur en carbone restant dans l'horizon A des modèles était strictement proportionnelle aux quantités de carbone apportées par la paille. Les équations de régression linéaire (1 et 2), nous ont permis d'estimer le carbone restant qui provient du sol (C_{r_s}) et de la paille de luzerne ajoutée (C_{r_p}).

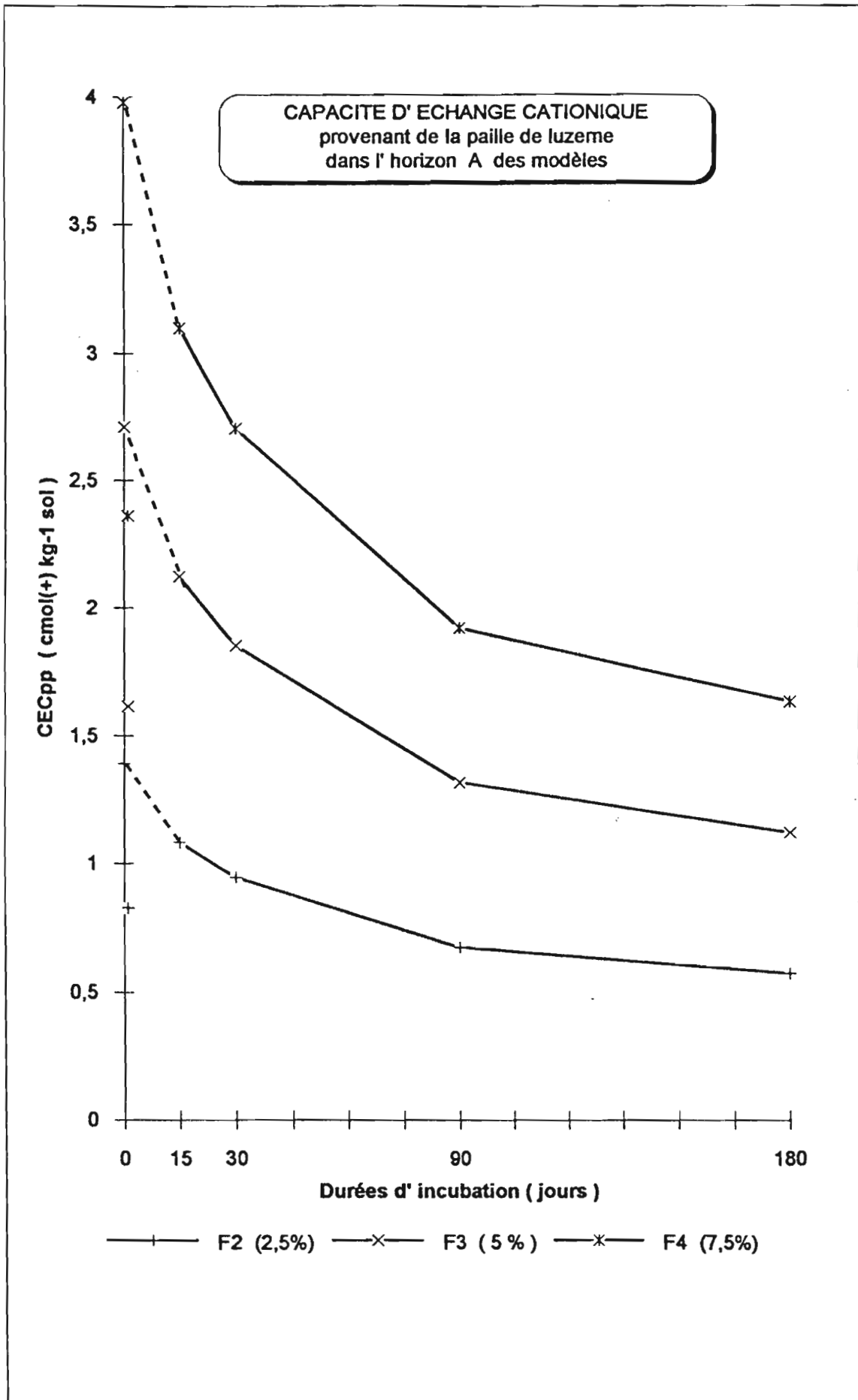
Pour chaque durée d'incubation, on constate (tabl.25) que la CEC de l'horizon A des modèles est étroitement corrélée à C_{r_p} teneur en carbone restant, qui provient de la paille:

$$(17) \quad \text{CEC} = a + b \times C_{r_p}$$

Ces régressions linéaires de la CEC en fonction de C_{r_p} confirment que les matières organiques qui proviennent de la décomposition de la paille ont une capacité d'échange moyenne "b×10³" qui s'accroît de 100 à 230 cmol(+) kg⁻¹ de carbone au cours des six mois d'incubation.

Les valeurs de "a" calculées sont légèrement inférieures aux valeurs moyennes de la CEC mesurées dans les modèles (F₁), en particulier pour le quinzième et le trentième jour. Ensuite les interactions (I_n) ou différences entre ces valeurs mesurées et calculées de la CEC de l'horizon A sans apport de paille, diminuent et sont pratiquement nulles en fin d'expérience. Les capacités d'échange du sol et des matières organiques provenant de la décomposition de la paille sont donc additives, sauf au cours des premiers mois.

FIGURE 14



EVOLUTION DE LA CEC DES MATIERES ORGANIQUES PROVENANT DE LA PAILLE

Pour chaque dose de paille ajoutée, nous avons étudié la cinétique d'évolution en fonction du temps "t" d'incubation (fig.14), de la CEC provenant de la paille, soit $CEC_{pp} = b \times C_{rp}$. La décroissance est forte et rapide entre la CEC de la paille ajoutée (t=0) et celle des matières organiques provenant de la paille, mesurée le premier jour. Mais à partir du quinzième jour CEC_{pp} décroît progressivement pendant le reste de l'expérience.

Si l'on ne tient pas compte des estimations de la CEC pour t= 0 et des mesures au premier jour, on constate que pour chaque dose de paille ajoutée, les CEC des matières organiques provenant de la paille s'ajustent approximativement à des cinétiques du premier ordre (tabl.25), avec des constantes de décroissance journalière "k" analogues, et des temps de demi-vie ($T_{1/2} = \ln 2 / K$) voisins de 300 jours:

$$(18) \quad CEC_{pp} = CEC_0 \times e^{-kt}$$

Les valeurs de CEC_0 et CEC_1 , estimées par ces régressions non-linéaires diffèrent nettement de celles de la paille ajoutée, et des valeurs mesurées le premier jour. Par conséquent, les cinétiques exprimées par l'équation (18) rendent seulement compte de l'évolution de la CEC_{pp} des matières organiques provenant de la paille, après un temps de latence de quelque jours.

2.2.2. CAPACITE D' ECHANGE DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES

Dans la première partie de cet exposé, nous avons analysé l'évolution des matières organiques contenues dans les fractions granulométriques obtenues par tamisage humide après agitation du sol dans l'eau avec des billes de verre, sans traitement aux ultra-sons. Les fractions granulométriques ainsi obtenues, ont été séchées à l'étuve ventilée à 60°C, puis passées au tamis de 2mm. Les mesures de la CEC de ces fractions granulométriques ont été réalisées avec la même méthode que pour les sols.

La comparaison des résultats obtenus (tabl.26) montre que la CEC des fractions fines A+L (inférieure à 50µm) est pratiquement identique, quel que soit la méthode de fractionnement utilisée (tamisage humide et à sec). Cette fraction qui est la moins riche en matière organique, est aussi celle dont la CEC est la plus faible. Ces résultats diffèrent donc de ceux obtenus avec un prétraitement très énergique par les ultrasons, par BREMNER et al (1990) sur des Mollisols de l'Iowa. Par ailleurs comme l'indique OADES (1990), la répartition des matières organiques dans les fractions granulométriques des Alfisols diffèrent souvent nettement de celle des Mollisols.

L'apport de paille de luzerne dans l'horizon A des modèles, suivi de six mois d'incubation, modifie faiblement l'importance, la quantité de carbone et la CEC de cette fraction A+L, obtenue par voie humide. Au total, dans ce sol limoneux, cette fraction A+L, qui représente les 2/3 du sol n'est responsable que de la moitié de la CEC du sol.

La fraction micro-agrégée SF (50-200µm) qui constitue 30% du sol est responsable de 39% de la CEC. Ceci s'explique par le fait que 41% des matières organiques du sol sont contenues dans cette fraction. Dans le sol enrichi en paille, la CEC et le poids de cette fraction micro-agrégée SF ont légèrement diminué par rapport à celles du sol initial ; il en résulte une baisse de la contribution de cette fraction SF à la CEC de l'horizon A, malgré des teneurs en carbone un peu plus élevées.

La fraction SG (0,2-2mm) est quantitativement peu importante. Bien que sa teneur en carbone et sa CEC soient beaucoup plus élevées que dans les autres fractions, sa contribution à la CEC du sol est modeste. Au bout de six mois d'incubation du sol enrichi en paille de luzerne calibrée, la teneur en carbone de cette fraction est nettement plus forte, alors que la CEC de cette fraction est plus faible. Deux explications, non exclusives entre elles, peuvent expliquer cette évolution contraire de la CEC et de la teneur en carbone de cette fraction macro-agrégée:

-Une grande partie des débris de paille contenus dans cette fraction SG se sont minéralisés. Les débris organisés restants, difficilement biodégradables ou stabilisés chimiquement (TIESSEN et al 1983) ont une faible CEC, ou sont séquestrés à l'intérieur de ces macroagrégats relativement stables, et certains sites d'échange sont masqués.

-L'accroissement de cette fraction SG est accompagnée d'une légère diminution de la fraction micro-agrégée SF. Une partie des micro-agrégats se retrouvent donc agglomérés dans des structures plus grossières (SG) (ELLIOT 1986); mais la capacité d'échange des micro-

TABLEAU 26

CAPACITE D' ECHANGE DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES (moyennes des répétitions)

Echantillons	Fractions	Poids des		CEC		Répartition de la CEC		Teneurs en C		Répartition du Carbone	
		fractions		des fractions		dans les fractions		des fractions		dans les fractions	
		granulo. %		cmol(+) kg ⁻¹		cmol(+) kg ⁻¹ sol		%		mg/g fraction		mg/g sol

FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE PAR AGITATION DANS L'EAU ET TAMISAGE HUMIDE

Sol initial	S6 (0,2-2,0mm)	4,34	48,21	2,09	11,4	108,73	4,72	21,5
de l'horizon A	SF (0,05-0,2mm)	30,72	23,40	7,19	39,4	29,42	9,03	41,1
sans paille	A+L (inf.0,05mm)	64,95	13,78	8,95	49,1	12,70	8,25	37,5
	Somme des fract.	97,4 %		18,33 = 92% CEC sol			22,00 = 86% C sol	

Horizon A	S6 (0,2-2,0mm)	6,16	42,94	2,65	14,3	146,25	9,01	33,3
180ème Jour	SF (0,05-0,2mm)	29,33	22,85	6,70	36,1	32,44	9,51	35,1
avec paille 7,5%	A+L (inf.0,05mm)	64,51	14,29	9,22	49,6	13,25	8,55	31,6
	Somme des fract.	97,9 %		18,57 = 99% CEC h,A			27,07 = 85% C h,A	

FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE A SEC

Sol initial	S6 (0,2-2,0mm)	64,32	19,86	12,77	68,6	28,9	18,95	71,7
de l'horizon A	SF (0,05-0,2mm)	15,14	21,23	3,21	17,2	30,7	4,70	17,8
sans paille	A+L (inf.0,05mm)	20,54	12,85	2,64	14,2	14,5	2,77	10,5
	Somme des fract.			18,62 = 94% CEC sol			26,42 = 104% C sol	
	Sol total			19,73			25,55	

Horizon A	S6 (0,2-2,0mm)	51,29	20,88	10,71	55,4	35,2	19,31	61,0
180ème Jour	SF (0,05-0,2mm)	18,52	23,00	4,26	22,1	42,2	7,50	23,7
avec paille 7,5%	A+L (inf.0,05mm)	30,19	14,41	4,35	22,5	17,8	4,87	15,4
	Somme des fract.			19,32 = 103%CEC h,A			31,68 = 100% C h,A	
	Hor. A total			18,73			31,70	

N.B.: Les poids, CEC et teneurs en Carbone des fractions hydrosolubles (W) n'ont pas été mesurés.

agrégats étant deux fois plus faible que celle des macroagrégats, il en résulte une baisse de la CEC de la fraction SG.

Au total, la contribution de cette fraction SG à la CEC de l'horizon A des modèles enrichis en paille augmente néanmoins en raison de l'augmentation du poids de cette fraction macro-agrégée.

Faute de méthode bien adaptée, nous n'avons pas mesuré la CEC de la fraction hydrosoluble (W). Un calcul par différence montre que cette fraction représente seulement environ 3% du poids du sol, mais elle renferme néanmoins près de 14 % de la teneur totale en carbone de ces échantillons de sol. Bien que cette fraction soit riche en polysaccharides, elle contient aussi certainement des composé organiques porteurs de radicaux carboxylique (acides fulviques libres); il est donc probable que sa CEC n'est pas négligeable. Toutefois au cours de la mesure de la CEC du sol, une partie importante de cette fraction W est lixiviée. Les estimations de la capacité d'échange des sols sont donc systématiquement entachées d'une erreur par défaut, correspondant à la CEC de cette fraction (W).

En résumé, si on fait abstraction de cette fraction hydrosoluble, la CEC du sol est à peu près égale à la somme des CEC des fractions granulométriques obtenues par tamisage humide. Par conséquent, cette méthode de fractionnement relativement douce n'augmente pas significativement l'accessibilité des charges réparties sur la surface externe des différents agrégats stables à l'eau, qui constituent ce sol.

Toutefois, suite à l'apport de paille calibrée, l'enrichissement en matières organiques des macroagrégats (SG) ne provoque pas une augmentation proportionnelle de la CEC de cette fraction du sol. Les modifications de l'organisation de cette fraction grossière seraient responsables de la non-additivité des CEC de ses constituants.

Par ailleurs, les CEC des fractions A+L obtenues par tamisage humide ou par tamisage à sec sont analogues (environ $14 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), bien que les fractions A+L obtenues par tamisage humide soient au moins deux fois plus riches en carbone organique que celles obtenues par tamisage à sec. On notera également que la CEC de cette fraction A+L est inférieure à l'estimation de la CEC des matières minérales de ce sol limoneux ($16,5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ de sol), évaluée par l'ordonnée à l'origine des régressions linéaires en fonction des teneurs en carbone.

Par conséquent, la CEC de ce sol ou de l'horizon A du modèle peut être considérée comme étant égale à la somme des CEC des différentes fractions agrégées, stables à l'eau. Par contre, dans chacune des fractions granulométriques, l'additivité des CEC des constituants organiques et des constituants minéraux de ces fractions peut être mise en doute. Une interaction négative, probablement due à des empêchements stériques, paraît réduire l'accroissement de la CEC des fractions granulométriques enrichies en constituants organiques.

2.2.3. CAPACITE D' ECHANGE CATIONIQUE DE L' HORIZON B DES MODELES

=====

Les variations de la CEC à pH:7 de l'horizon B des modèles sont plus limitées que pour l' horizon A. Cependant l'apport de paille de luzerne dans l'horizon A provoque une décroissance régulière et significative de la CEC de l' horizon B au cours des six mois d' expérience (fig.15) et (annexe.13).

Influence des matières organiques illuviées: Les variations de la capacité d'échange ne paraissent pas en relation avec l'évolution des teneurs en matière organique dans l' horizon B. En effet celles-ci restent constantes pour les modèles (F₁) et présentent une modeste accumulation transitoire du carbone entre le 15^e et le 30^e jour et d'azote entre le 30^e et le 90^e jour pour les traitements (F₂), (F₃) et (F₄).

Influence des sesquioxydes dits "libres": La présence d'hydroxydes de fer dans les percolats recueillis à la fin du premier mois sous les modèles enrichis en paille (cf. §:2.5 ci-dessous), nous a amené à nous demander s'il n'y aurait pas un blocage de sites d'échange négativement chargés de l'horizon B, par des hydroxydes de recouvrement chargés positivement (ROTH et al. 1969). Les dosages réalisés avec le réactif de Tamm (pH:3) montrent que les teneurs en alumine extraite de l'horizon B des modèles restent constantes. L'augmentation des teneurs en fer extrait de l'horizon B des modèles, dont l'horizon A a été enrichi en paille, est par contre très marquée à la fin du premier mois; mais elle s'atténue ensuite et devient à peine significative en fin d'expérience (tabl.27). Par conséquent, il n'existe pas de parallélisme entre les teneurs en fer dit "libre" et la diminution de la CEC de l'horizon B des modèles enrichis en paille. L'hypothèse du blocage de sites d'échange par des sesquioxydes paraît donc douteuse.

Deux contre-expériences ont néanmoins été tentées (tabl.27) en mesurant la CEC de l'horizon B après extraction des sesquioxydes dits "amorphes" ou "libres" par le réactif de Tamm (oxalate d'ammonium-acide oxalique, pH:3); ou extraction des complexes organo-métalliques par le tétraborate de potassium, (pH:9,7) (JEANROY 1983):

- Le traitement de l'horizon B par le réactif de Tamm (pH:3) s'accompagne d'une nette augmentation de la CEC (pH:7) du culot de sol. Ceci confirme les observations faites par différents auteurs avec la méthode CDB (Citrate-Dithionite-Bicarbonate) (ROTH et al. 1969, CURTIN et SMILLIE 1979). Toutefois, cet accroissement de la capacité d'échange de l'horizon B est analogue pour tous les modèles, avec ou sans apport de paille, et quelles que soient les durées d' incubation. On remarque par ailleurs que l' aluminium extrait par ce réactif à partir de l' horizon B des différents modèles est pratiquement constant. Par contre, les teneurs en fer extractible sont un peu plus élevées, au bout de six mois d'incubation, pour les modèles enrichis en paille.

Le réactif de Tamm pourrait donc démasquer un certain nombre de sites d'échange (à pH:7) de l'horizon B du sol initial et des différents modèles, qui seraient initialement bloqués par des oxydes ou hydroxydes. Toutefois les résultats de cette expérience n'expliquent pas la décroissance simultanée entre la fin du premier mois et le sixième mois,

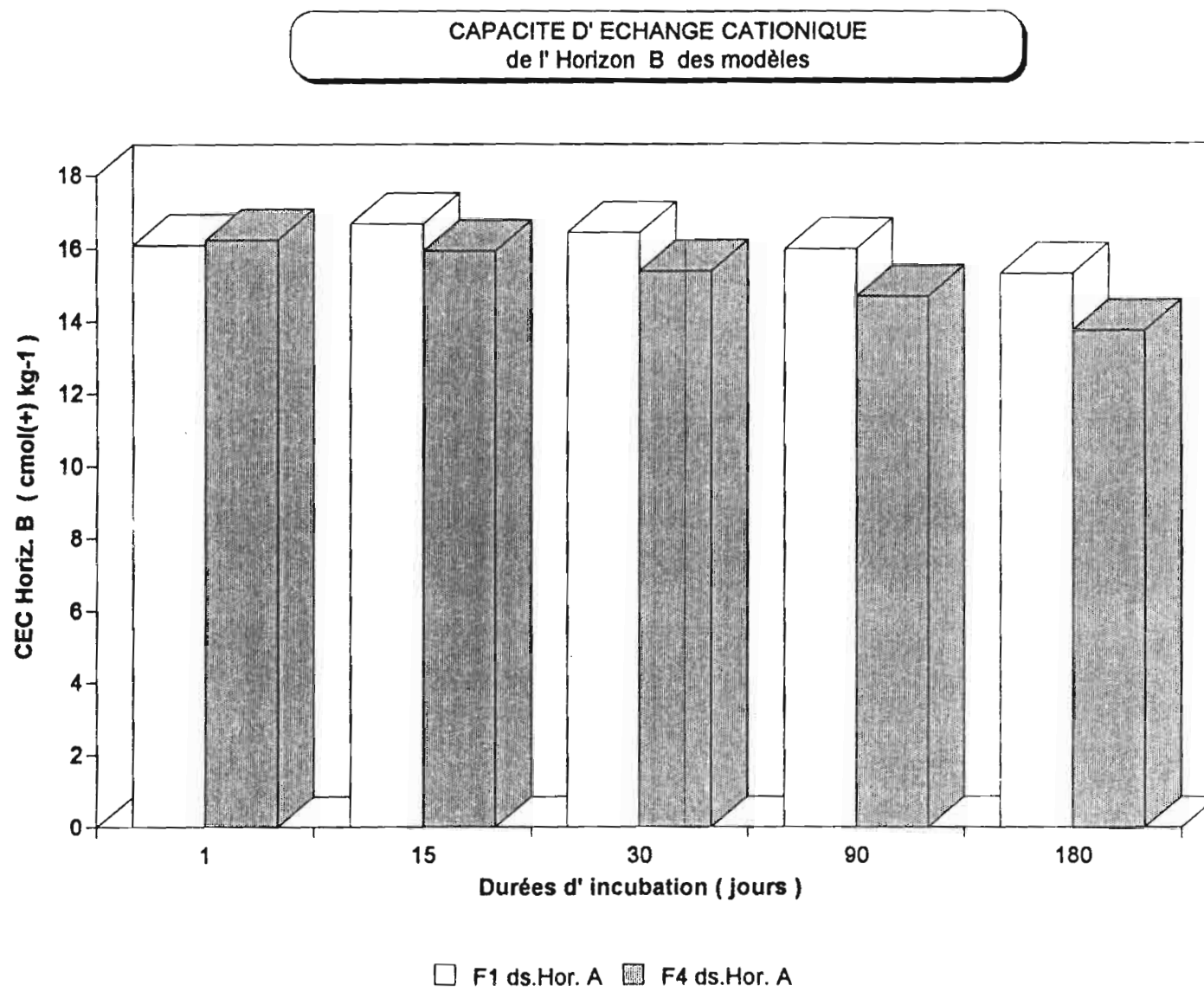


FIGURE 15

TABLEAU 27

Modèle A+B FER et ALUMINE libre dans l'horizon B
(Tamm pH:3 dans l'obscurité, en % sol séché l'air)

Fumures dans l'horizon A	Durées sol initial	Fer libre			Alumine libre			
		30ème Jour	180ème Jour	*	sol initial	30ème Jour	180ème Jour	
F1 (sans paille)		0,24	0,23	0,25	*	0,19	0,19	0,21
		0,26	0,23	0,25	*	0,19	0,19	0,21
Moyennes :		0,25	0,23	0,25	*	0,19	0,19	0,21
F4 (7,5% de paille)			0,65	0,36	*		0,20	0,21
		-	0,60	0,31	*	-	0,22	0,19
Moyennes :			0,63	0,34	*		0,21	0,20

Modèles HA+HB INFLUENCE DES SESQUIOXYDES SUR LA CEC DE L' HORIZON B'

Prétraitements Lavages	Echantillon	initial	Capacité d' Echange Cationique (pH:7) (CEC cmol(+) kg-1 ou me/100g)				Sesquioxydes extraits par les prétraitements Fe2O3 (pour cent) ; Al2O3 (pour cent)					
			néant	néant	TBK (pH:10)	TAMM (pH:3)	TBK (pH:10)	TAMM (pH:3)	TBK (pH:10)	TAMM (pH:3)		
				K2SO4,M/10	K2SO4,M/10	K2SO4,M/10		K2SO4,M/10	K2SO4,M/10	K2SO4,M/10	K2SO4,M/10	
			16,6	13,9	14,7	19,7	::	inf,0,05	0,25	:	0,65	0,19
	Horizon B (F1) 1er jour		16,1		14,4	19,6	::	inf,0,03	0,25	:	0,95	0,20
	Horizon B (F4) 1er jour		16,2		14,6	19,7	::	inf,0,03	0,25	:	0,72	0,21
	Horizon B (F1) 180ème j.		15,3		13,8	18,9	::	inf,0,03	0,23	:	0,62	0,19
	Horizon B (F4) 180ème j.		13,7		13,6	19,1	::	inf,0,03	0,32	:	1,58	0,19

N.B: Traitement F1 sans apport de paille de luzerne dans l'horizon A du modèle
 Traitement F4 avec apport de 7,5 % de paille dans l'horizon A des modèles
 TBK ; Tétraborate de potassium + Potasse (pH:10)
 TAMM ; Oxalate d'ammonium + Ac.oxalique (pH:3,0)

d'une part du fer extractible par le réactif de Tamm (tabl.27), d'autre part de la CEC de l'horizon B des modèles, dont l'horizon A a été enrichi en paille (annexe 13).

- Influence du fer et de l'aluminium complexés: Le tétraborate extrait très peu de fer et d'aluminium dits "complexés" à partir de l' horizon B₂ de ces sols bruns sur limon. Néanmoins, ce prétraitement provoque une diminution de la CEC, qui est du même ordre de grandeur dans les horizons B des modèles avec ou sans apport de paille, et qui diminue faiblement en fonction de la durée d'incubation. Toutefois avant de mesurer la CEC, l'élimination du tétraborate restant dans les culots de centrifugation a nécessité un lavage par une solution de K₂SO₄, M/10 pour flocculer les minéraux argileux du sol, et éviter les pertes d'éléments fins. Or le simple traitement de ce sol par le sulfate de potassium provoque une diminution de sa CEC du même ordre de grandeur que celle observée après extraction des complexes organo-métalliques par le tétraborate et lavage du sol par le sulfate de potassium (tabl.27). Le masquage de sites d'échange fonctionnels à pH:7 par des complexes organo-métalliques ne paraît donc pas vérifié pour ce sol.

Influence sur la CEC de l'ammonium et du potassium fixé: La baisse de la CEC du sol initial après traitement par le sulfate de potassium est analogue à celle observée pour l'horizon B des modèles (F₄), au sixième mois d'incubation, avec ou sans lavage par K₂SO₄. L'étude de la fixation de l'ammonium dans cet horizon (cf.ci-dessus §:1.3.2.) et de la fixation du potassium dans l'ensemble des modèles (cf.ci-dessous §:2.4.3.), nous conduisent à penser que l'apport de potassium et d'ammonium par la paille ajoutée dans l'horizon A des modèles, est suivie par la lixiviation et la fixation (ou rétrogradation) d'une partie de ces cations dans l'horizon B des modèles. La pénétration de ces cations de faible diamètre dans les cavités hexagonales des minéraux phylliteux 2:1 réduit les déficits de charges dus à des substitutions isomorphiques (ROBERT et TROCMÉ 1979).

En conclusion, la diminution progressive de la CEC de l'horizon B des modèles enrichis en paille serait due principalement à une diminution des charges permanentes des minéraux argileux, suite à l'illuviation et à la fixation de potassium et/ou d'ammonium dans cet horizon. Les résultats de ces expériences réalisées en modèle de laboratoire enrichis par de la paille de luzerne confirment ceux qu'avaient obtenus PAGE & al. (1967) avec des solutions minérales. Il se confirme que la réduction de la CEC des minéraux argileux de type vermiculite serait limitée (ici environ 3 cmol(K⁺) kg⁻¹) par un plafond qui correspond à la capacité maximum de fixation de l'ammonium et/ou du potassium.

Dans ces sols possédant essentiellement des argiles 2:1, l'enfouissement de végétaux peut donc entraîner une certaine diminution de la capacité d'échange cationique due à ces minéraux argileux, et en même temps, provoquer un stockage de potassium et d'ammonium sous une forme non-échangeable ou fixée, c'est à dire dont la disponibilité pour les cultures n'est pas immédiate.

2.3. GARNITURE CATIONIQUE DU COMPLEXE ADSORBANT DES MODELES

La décomposition et la minéralisation de la paille de luzerne apportée dans l'horizon A des modèles provoque une libération de bases alcalines et alcalino-terreuses. Pour la dose de paille la plus forte (F₄), ces intrants sont de l'ordre des deux tiers des bases échangeables contenues initialement dans les horizons A et B des modèles sans apport de paille (F₁). Toutefois, l'humification et la minéralisation de la paille n'est pas immédiate ni totale; par contre, comme nous le verrons, presque la moitié de ces bases passe sous forme de cations échangeables dès les premiers jours d'incubation.

Ces cations (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ et Na⁺) peuvent s'échanger, et être retenus par le complexe adsorbant de l'horizon A, abondé par la CEC des matières organiques provenant de la décomposition et de l'humification de la paille. Ils peuvent également être fixés ou rétrogradés sous des formes non-échangeables dans les minéraux argileux de l'horizon A des modèles. Ils peuvent enfin être lixiviés hors de l'horizon A en raison du régime percolatif hebdomadaire, et de l'enrichissement de la solution du sol par des composés organiques hydrosolubles provenant de la décomposition de la paille, qui sont porteurs de fonctions acides (carboxyliques et hydroxyles phénoliques), et/ou dotés d'un certain pouvoir complexant.

Une partie des cations éluviés dans l'horizon A peuvent également être échangés et retenus sur le complexe adsorbant ou fixés dans l'horizon B des modèles. Ils peuvent enfin être recueillis dans les percolats, c'est à dire sortir des modèles. Le dosage des cations échangeables dans les horizons A et B des modèles et des bases recueillies dans les percolats, au cours des différentes périodes d'incubation, permettent d'établir des bilans successifs pour chaque cation, en fonction des doses de paille ajoutées dans les différents modèles (A) ou (A+B).

2.3.1. EVOLUTION DES CATIONS ECHANGEABLES DANS LES HORIZONS A ET B

HORIZON A:

Pour les modèles (F₁) sans apport de paille, les teneurs en Mg²⁺, K⁺ échangeables de l'horizon A des modèles ne subissent pas de variations significatives au cours des six mois d'incubation. Par contre les teneurs en Ca²⁺ échangeable dans l'horizon A s'accroissent temporairement entre le quinzième et le trentième jour, puis redeviennent analogues aux teneurs initiales, à partir du troisième mois. Enfin les teneurs en Na⁺ décroissent de 25% au cours des trois premiers mois. (cf. annexes 15 à 18)

Dans les modèles (F₂), (F₃) et (F₄) la somme des cations basiques échangeables (SBE) de l'horizon A est proportionnelle aux quantités de bases apportées dans la paille, au cours des quinze premiers jours (annexe 14 et tabl.28). L'enrichissement en cations échangeables (α) représente alors 45% des bases apportées par la paille enfouie dans l'horizon A. Par la suite le coefficient " α " décroît jusqu'à 22%, mais les régressions entre les teneurs en cations échangeables dans l'horizon A et les bases apportées par la paille deviennent de moins en moins

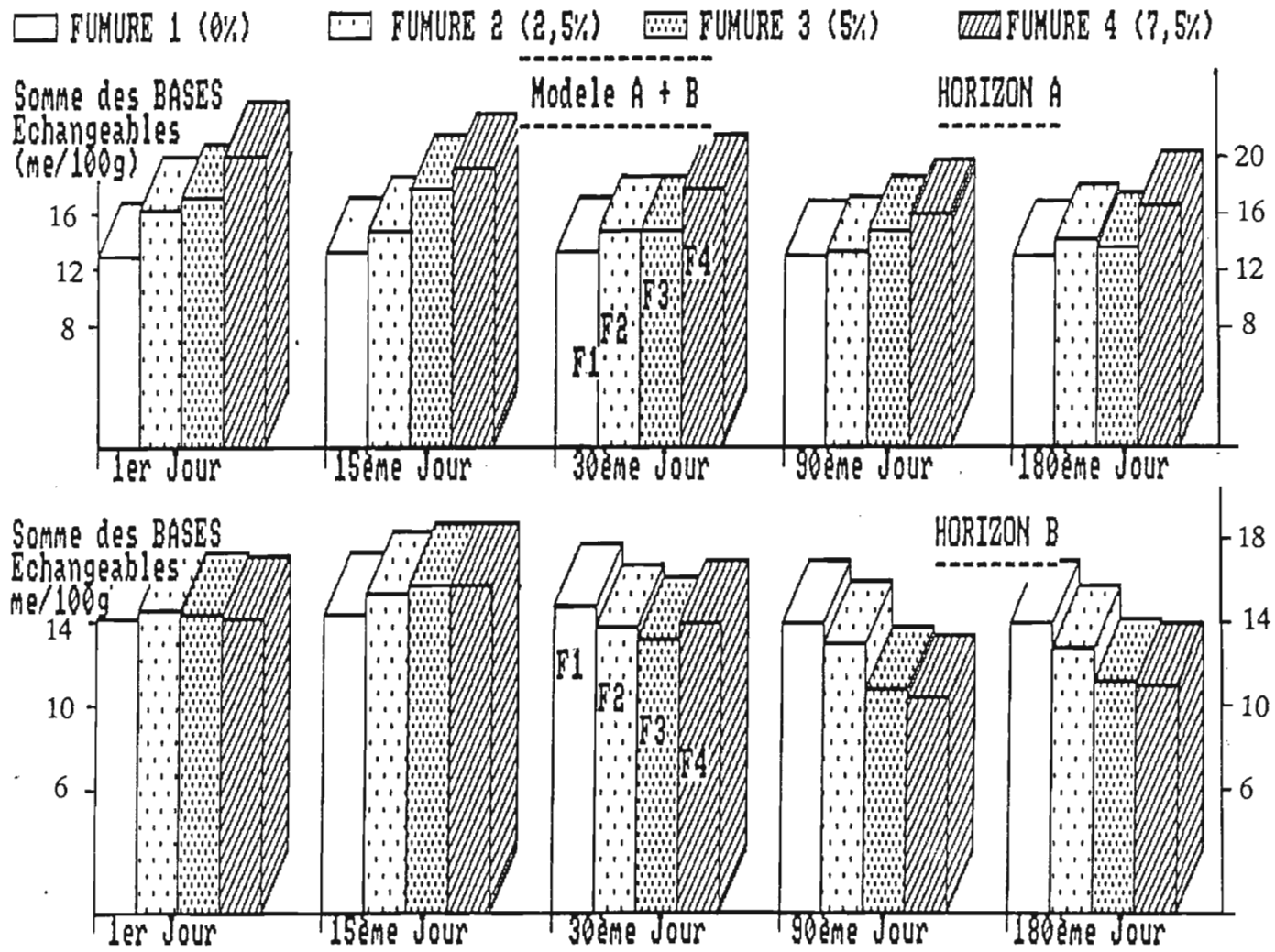


FIGURE 16

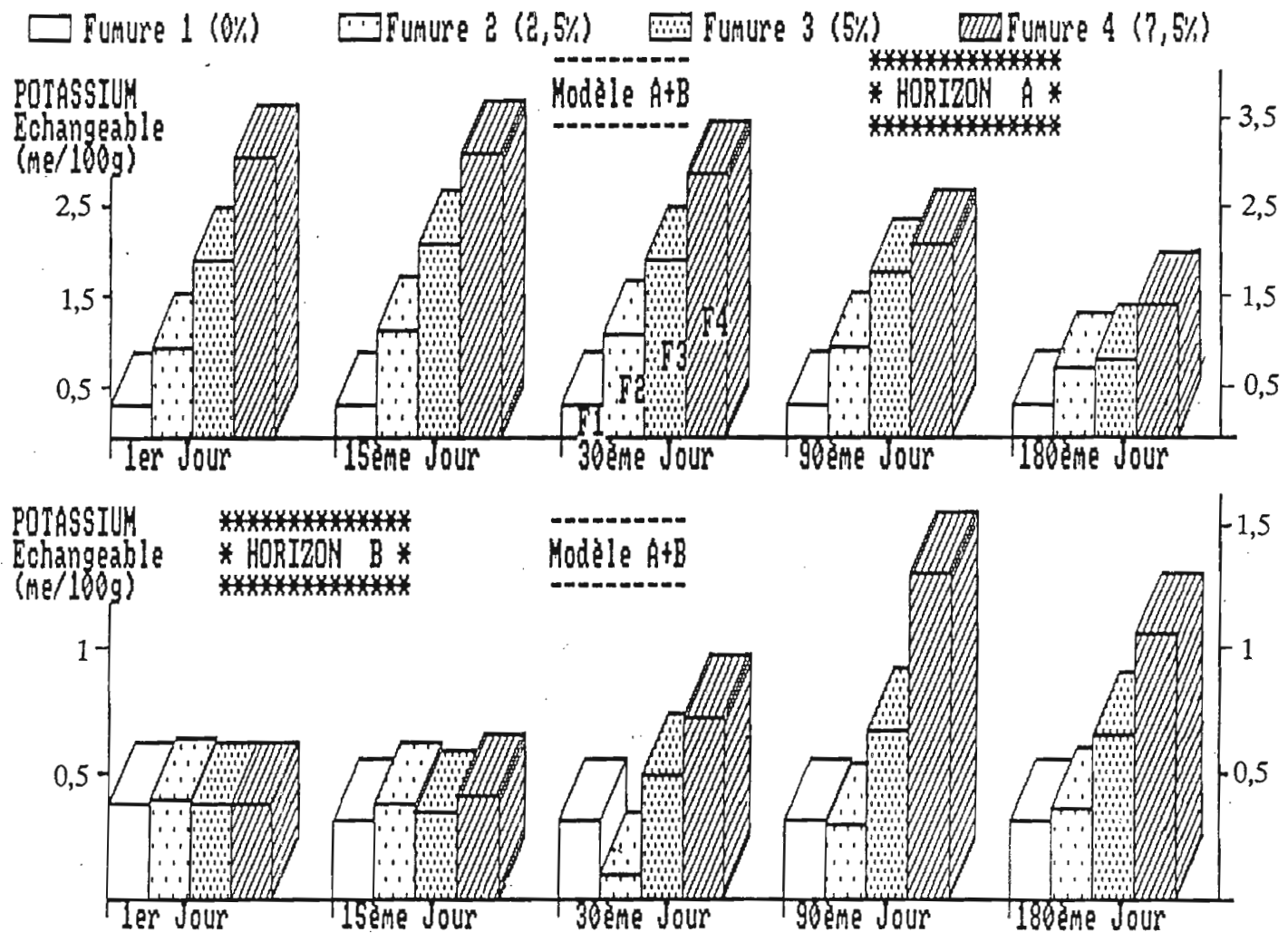


FIGURE 17

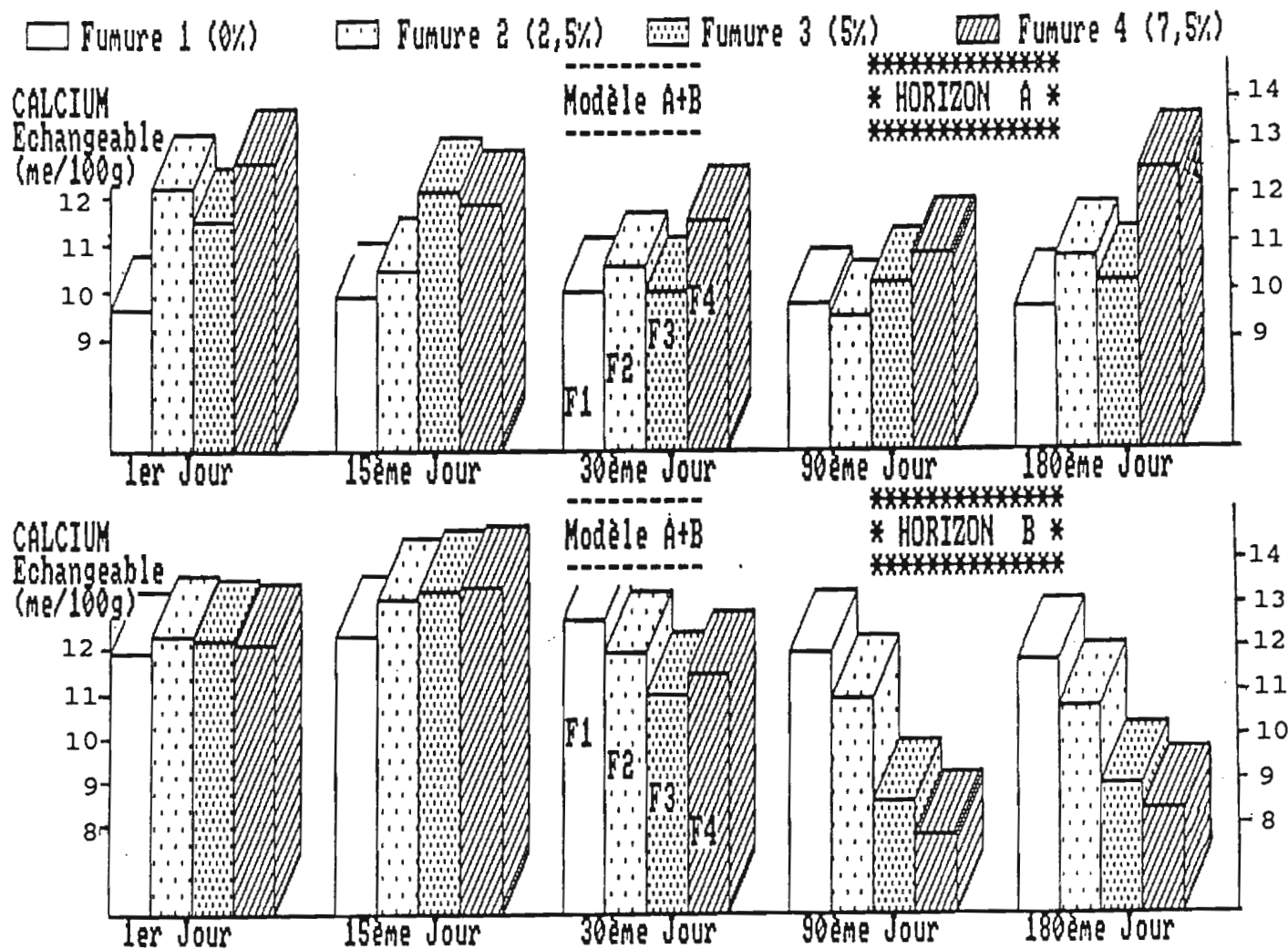


FIGURE 18

TABLEAU 28

Modèle A+B Somme des Bases Echangeables dans l'horizon A (cmol(+) kg⁻¹)
 ----- Régression en fonction des bases contenues dans la paille
 $SBE(hA) = SBE(hA)_0 + \alpha * SB(paille)$

Durées (Initiales)	SBE(hA) F1 (mesure moy.) (12,30)	SBE(hA) ₀ (calculées)	alpha	Coefficient R ² de détermination
1er Jour	12,58	12,92	0,447	0,937
15ème Jour	12,77	12,64	0,444	0,976
30ème Jour	12,82	12,66	0,301	0,842
90ème Jour	12,54	12,28	0,221	0,675
180ème Jour	12,48	12,30	0,228	0,593

Paille ajoutée à 100g Hor. A;	F1 (0%)	F2 (2,5%)	F3 (5%)	F4 (7,5%)
SB(paille) mmol(+)	0,00	4,42	8,84	13,27

Modèle A+B POTASSIUM ECHANGEABLE DANS L'HORIZON A (cmol(+) kg⁻¹)
 ----- régression en fonction du K de la paille ajoutée
 $K(hor,A) = K(hor,A)_0 + \alpha * K(paille)$

Durées:	K (hor,A) ₀ (mesure moy.) (0,39)	K (hor,A) ₀ (calculé)	alpha	Coefficient R ² de détermination
1er Jour	0,40	0,237	0,665	0,983
15ème Jour	0,42	0,362	0,670	0,995
30ème jour	0,42	0,380	0,612	0,996
90ème Jour	0,44	0,475	0,444	0,969
180ème Jour	0,43	0,418	0,204	0,931

Paille ajoutée à 100g Hor. A;	F1 (0%)	F2 (2,5%)	F3 (5,0%)	F4 (7,5%)
K (psille) mmol(+)	0,00	1,63	3,26	4,89

significatives. En fait, chaque cation a une dynamique différente, et la garniture cationique de l'horizon A subit d'importantes modifications qualitatives et quantitatives, en fonction du temps d'incubation et des doses de paille apportées (fig.16).

Potassium échangeable: Les teneurs en potassium échangeable dans l'horizon A des modèles (fig.17) restent proportionnelles au potassium apporté par la paille tout au long de l'expérience (tabl.28), mais la pente " α " des droites de régression décroît de 67% à 20% entre les premiers jours et le 180ème jour. C'est à dire que les deux tiers du potassium apporté par la paille passent sous forme échangeable au cours des premiers jours. La plus grande partie de K^+ est ensuite soit fixée, soit lixiviée hors de l'horizon A. Au bout de six mois d'incubation, les horizons A des modèles enrichis en paille ont encore des teneurs en K^+ échangeable deux à trois fois plus importante que dans les modèles (F_1).

Ammonium échangeable: Nous avons vu que l'ammonification de l'azote contenu dans l'horizon A des modèles provoquait au cours du premier mois une augmentation des teneurs en ammonium échangeable (annexe 19, fig.6); mais les teneurs en NH_4^+ échangeable dans l'horizon A sont sensiblement les mêmes pour les trois doses de paille ajoutées. Par la suite, les teneurs en NH_4^+ échangeable dans l'horizon A décroissent et deviennent presque identiques à celles des modèles (F_1).

Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ échangeables: L'augmentation des teneurs en Ca^{2+} et Mg^{2+} échangeables dans l'horizon A est relativement faible même en début d'incubation (fig.18 et annexes: 15 et 16), et il n'y a pas proportionnalité stricte avec les différentes doses de Ca et Mg apportées par la paille. Dès le trentième jour, l'accroissement du Ca^{2+} et surtout de Mg^{2+} et de Na^+ échangeables (annexe: 18) dans l'horizon A des modèles enrichis en paille devient très faible et même négatif pour ces deux derniers cations.

On observe donc successivement pour les modèles enrichis en paille de luzerne, une phase de saturation par des cations basiques en début d'expérience, puis de désaturation du complexe adsorbant de l'horizon A.

HORIZON B:

La somme des cations basiques échangeables dans l'horizon B des modèles (F_1) varie très faiblement. Mg^{2+} et Na^+ échangeables restent constants. Comme dans l'horizon A, Ca^{2+} échangeable s'accroît légèrement dans l'horizon B entre le quinzième et le trentième jour, puis décroît un peu en dessous des valeurs initiales, au cours des trois derniers mois. Enfin les teneurs en K^+ échangeable dans l'horizon B des modèles (F_1) décroissent légèrement au cours des tous premiers jours, puis restent constantes.

Pour les autres modèles (F_2), (F_3), (F_4) dont l'horizon A est enrichi en paille, on observe une légère augmentation de la somme des cations basiques échangeables (SBE) de l'horizon B au quinzième jour, puis une diminution marquée de SBE par rapport au modèle témoin, dès le premier mois (annexe 14). A partir du troisième mois, la SBE de l'horizon B des modèles (F_3) et (F_4) est inférieure de 25% à celle de l'horizon B des modèles (F_1).

L'apport de fortes doses de paille dans l'horizon A provoque donc une désaturation significative du complexe adsorbant de l'horizon B de ces modèles.

Lorsque l'on examine séparément l'évolution de chaque cation, on constate que l'accroissement des teneurs en Ca²⁺ et Mg²⁺ échangeables dans l'horizon B des modèles (F₂), (F₃) et (F₄) est modeste et intervient vers le quinzième jour; mais par la suite, les teneurs en Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺ échangeables dans l'horizon B deviennent plus faibles que dans les modèles (F₁) sans apport de paille (fig.18).

L'accroissement des teneurs en K⁺ échangeable dans l'horizon B des modèles enrichis en paille est plus tardif, et seulement significatif pour les modèles (F₃) et (F₄). Les teneurs maxima sont observées vers le troisième mois et l'accroissement de K⁺ échangeable dans l'horizon B de ces modèles est encore très net en fin d'expérience (fig.17).

Les variations des teneurs en ammonium échangeable dans l'horizon B des modèles (annexe 19, et fig.6) sont très analogues à celles du potassium. Pour les modèles (F₃) et (F₄), l'accroissement des teneurs en NH₄⁺ échangeable est un peu plus précoce et les maxima sont relativement plus importants. La décroissance des teneurs en ammonium échangeable dans l'horizon B de ces deux modèles, est un peu plus rapide en fin d'expérience.

Au total, pour les modèles enrichis en paille, les variations en sens inverse dans les horizons B d'une part des teneurs en K⁺ et NH₄⁺ échangeables et d'autre part de Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺ échangeables ne se compensent qu'en partie. Par conséquent pour ces modèles, les solutions qui percolent l'horizon B paraissent avoir à partir du premier mois un effet globalement lixiviant sur les cations basiques échangeables contenus dans cet horizon.

2.3.2. EVOLUTION DES CATIONS ECHANGEABLES DANS L'ENSEMBLE DES MODELES

Compte tenu des poids de sol placés dans l'horizon A (250g) et l'horizon B (150g) des modèles, il est possible d'estimer l'évolution des stocks de cations basiques sous forme échangeable dans l'ensemble des modèles (annexes 20 à 23).

L'accroissement des teneurs en Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺ échangeables dans l'ensemble des modèles suite à l'apport de paille est important au cours des premiers jours. Entre le quinzième et le trentième jour, les stocks de Ca²⁺ échangeable dans l'ensemble des modèles diminuent fortement. Ils présentent un minimum vers le troisième mois et se stabilisent en fin d'expérience avec des stocks de Ca²⁺ échangeable un peu plus élevés pour les modèles enrichis en paille. Par contre dès la fin du premier mois, les stocks de Mg²⁺ et Na⁺ échangeables dans les modèles enrichis en paille deviennent inférieurs aux stocks de ces éléments sous forme échangeable contenus dans les modèles témoin (F₁). Il y a donc une diminution nette du stock de Mg²⁺ et Na⁺ échangeable dans l'ensemble des modèles pourtant enrichis en paille.

Les stocks de potassium échangeable dans l'ensemble des modèles sont également maximum dès les premiers jours (annexe 22). Ils diffèrent fortement suivant les doses de paille apportées et restent très stables pendant le premier mois. Ils décroissent ensuite très lentement. En fin d'expérience, l'accroissement des stocks en K⁺

échangeable dans les modèles enrichis en paille sont encore significativement plus élevés que dans les modèles témoins (F_1). Il y a donc un accroissement net du potassium échangeable.

Les stocks d'ammonium échangeable dans l'ensemble des modèles (F_2), (F_3) et (F_4) s'accroissent régulièrement et d'une manière analogue pour les trois doses, au cours du premier mois. Ils décroissent ensuite progressivement, et sont pratiquement identiques aux stocks d' NH_4^+ échangeable des modèles témoins (F_1) en fin d'expérience.

Au total, les stocks de bases échangeables dans l'ensemble des modèles (F_1), sans apport de paille restent à peu près constants au cours de l'expérience (annexe 24). Dans les modèles (F_2), (F_3) et (F_4), l'enrichissement en cations échangeables est maximum au cours des premiers jours d'incubation. On observe ensuite une décroissance marquée des stocks d'éléments échangeables au cours du premier mois, plus lente ensuite. Les stocks de bases échangeables sont minimum vers le troisième mois et à peine supérieurs aux stocks présents dans les modèles témoins (F_1). Ils augmentent faiblement pour les modèles (F_2) et (F_4) en fin d'expérience.

2.3.3. EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR LA GARNITURE CATIONIQUE DES

MODELES

Somme des cations basiques échangeables (tabl.29): L'accroissement des stocks de cations échangeables, dus à l'apport de paille peuvent être calculés en retranchant les stocks moyens mesurés dans les modèles témoins (F_1):

Pour l' horizon A des modèles, les différences entre stocks (F_2-F_1), (F_3-F_1) et (F_4-F_1) sont maxima en début d'expérience pendant les quinze premiers jours, puis elles décroissent fortement au cours de la deuxième quinzaine. L'accroissement des stocks de cations échangeables dus à l'apport de paille devient minimum au troisième mois, il remonte légèrement au cours des derniers mois, sauf pour (F_3).

Pour l'horizon B, l'accroissement des stocks de bases échangeables est plus modeste et intervient vers le quinzième jour; mais dès le premier mois, l'apport de paille provoque un appauvrissement net en bases échangeables de l'horizon B des modèles. Cette diminution de la SBE de l'horizon B est surtout marquée vers le troisième mois. Elle décroît légèrement en fin d'expérience.

L'effet de l'apport de paille sur l'accroissement de la SBE pour l'ensemble des modèles (A+B) est donc surtout marqué pendant le premier mois. Par la suite, il devient très faible voire négatif. Cependant l'effet de l'apport de paille diffère pour chaque cation.

Magnésium (tabl.30): L'effet de l'apport de paille sur l'augmentation de Mg échangeable dans les horizons A et B des modèles est modeste et limité à une quinzaine de jours. Ensuite, la diminution des stocks de Mg^{2+} échangeable est la plus marquée surtout dans l'horizon B après le troisième mois. Au total, la diminution des stocks de Mg^{2+} échangeable entre les premiers jours et la fin de l' expérience est supérieure à Mg apporté par la paille. Comme nous le verrons, l'apport de paille provoque donc une lixiviation nette de Mg^{2+} , qui provient donc en partie de la paille, mais aussi des sols des deux horizons des modèles.

TABLEAU 29

Modèle A+B	EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR LA SOMME DES BASES ECHANGEABLES						Modèle A

	Durées : 1er Jour 15ème J. 30ème J. 90ème J. 180ème J.						180ème J.

Fumures	Accroissement de S.B.E. dans l'horizon A (cmol(+) kg-1)						
F2-F1	3,23	1,39	1,40	0,33	1,17		* 1,25
F3-F1	4,08	4,25	1,58	1,73	0,63	Moyennes	* 3,32
F4-F1	6,75	5,60	4,38	2,80	3,54		* 2,92

	Accroissement de S.B.E. dans l'horizon B (cmol(+) kg-1)						
F2-F1	0,52	1,06	-0,97	-1,05	-1,10		*
F3-F1	0,38	1,37	-1,56	-3,32	-2,84	Moyennes	*
F4-F1	0,14	1,38	-0,84	-3,57	-2,99		*

	(paille) Accroissement de la S.B.E. dans les modèles (mmol(+) /modèle)						
F2-F1 (11,06)	8,86	5,07	2,05	-0,75	1,28		* 3,13
F3-F1 (22,11)	10,77	12,68	1,61	-0,66	-2,69	Moyennes	* 8,30
F4-F1 (33,17)	17,09	16,07	9,69	1,65	4,37		* 7,30

Modèle A+B	EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR Ca ECHANGEABLE						* Modèle A

	Durees: 1er Jour 15ème J. 30ème J. 90ème J. 180ème J.						* 180ème J.

FUMURES	Accroissement de Ca éch. dans l'horizon A (cmol(+) kg-1)						
F2-F1	2,25	0,48	0,47	-0,19	0,90		* 0,77
F3-F1	1,66	1,98	-0,04	0,39	0,49		* 2,27
F4-F1	2,77	1,74	1,36	1,01	2,61		* 1,45

	Accroissement de Ca échangeable dans l'horizon B (cmol(+) kg-1)						
F2-F1	0,32	0,77	-0,70	-0,97	-0,93		*
F3-F1	0,29	0,94	-1,67	-3,23	-2,73		*
F4-F1	0,18	1,07	-1,21	-4,00	-3,25		*

	(paille) Accroissement de Ca échangeable dans les modèles (mmol(+) /modèle)						
F2-F1 (5,97)	6,11	2,36	0,13	-1,93	0,86		* 1,93
F3-F1 (11,94)	4,59	6,36	-2,61	-3,87	-2,87		* 5,68
F4-F1 (17,91)	7,20	5,96	1,59	-3,48	1,65		* 3,63

TABLEAU 30

Modèle A+B	EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR Mg ECHANGEABLE					* Modèle A
-----	*****					*-----
Durées	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	* 180ème J.

FUMURES	Accroissement de Mg échangeable dans l'horizon A (cmol(+) kg-1)					
F2-F1	0,20	-0,07	-0,01	-0,16	-0,01	* -0,13
F3-F1	0,44	0,13	-0,27	-0,03	-0,34	Moyennes * -0,06
F4-F1	0,67	0,52	-0,01	-0,03	-0,22	* -0,43

	Accroissement de Mg échangeable dans l'horizon B (cmol(+) kg-1)					
F2-F1	0,16	0,22	-0,02	-0,02	-0,13	* -0,13
F3-F1	0,09	0,39	-0,06	-0,42	-0,38	Moyennes * -0,06
F4-F1	0,09	0,39	-0,06	-0,42	-0,38	* -0,38

	(paille) Accroissement de Mg échangeable dans les modèles (mmol(+)/modèle)					
F2-F1 (0,88)	0,74	0,16	-0,06	-0,43	-0,22	* -0,33
F3-F1 (1,75)	1,24	0,91	-0,77	-0,72	-1,42	Moyennes * -0,15
F4-F1 (2,63)	1,81	1,89	-0,12	-0,70	-1,12	* -1,08

Modèle A+B	EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR K ECHANGEABLE					* Modèle A
-----	*****					*-----
Durées:	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	* 180ème J.

Fumures	Accroissement de K échangeable dans l'horizon A (cmol(+) kg-1)					
F2-F1	0,75	0,96	0,93	0,71	0,47	* 0,62
F3-F1	1,89	2,10	1,89	1,70	0,59	Moyennes * 1,14
F4-F1	3,24	3,26	3,01	2,09	1,26	* 1,92

	Accroissement de K échangeable dans l'horizon B (cmol(+) kg-1)					
F2-F1	0,03	0,07	-0,23	-0,02	0,04	* 0,04
F3-F1	0,01	0,03	0,19	0,38	0,36	Moyennes * 0,36
F4-F1	0,00	0,10	0,43	1,05	0,78	* 0,78

	(paille) Accroissement de K échangeable dans les modèles (mmol(+)/modèle)					
F2-F1 (4,08)	1,92	2,51	1,98	1,75	1,24	* 1,55
F3-F1 (8,15)	4,74	5,30	5,01	4,82	2,02	Moyennes * 2,85
F4-F1 (12,23)	8,10	8,30	8,17	6,80	4,32	* 4,80

TABLEAU 31

Modèle A+B	EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR Na ECHANGEABLE					* Modèle A
-----	*****					* -----
	Durées:	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.
						* 180ème J.

Fumures	Accroissement de Na échangeable dans l'horizon A (cmol(+) kg-1)					
F2-F1	0,03	0,01	0,01	-0,03	-0,10	* -0,01
F3-F1	0,06	0,04	-0,01	-0,02	-0,11	Moyennes * -0,02
F4-F1	0,09	0,08	0,02	-0,04	-0,11	* -0,01

	Accroissement de Na échangeable dans l'horizon B (cmol(+) kg-1)					
F2-F1	0,02	0,01	-0,03	-0,05	-0,08	* -0,01
F3-F1	0,01	0,01	-0,02	-0,05	-0,09	Moyennes * -0,02
F4-F1	-0,01	-1,02	-0,02	-0,04	-0,09	* -0,01

	(paille)	Accroissement de Na échangeable dans les modèles (mmol(+)/modèle)				
F2-F1 (0,14)	0,11	0,04	-0,02	-0,15	-0,37	* -0,03
F3-F1 (0,28)	0,17	0,12	-0,06	-0,13	-0,41	Moyennes * -0,05
F4-F1 (0,41)	0,21	-1,33	0,02	-0,16	-0,41	* -0,03

Modèle A+B	EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR L'AMMONIUM ECHANGEABLE					* Modèle A
-----	*****					* -----
	Durées :	1er Jour	15ème Jour	30ème Jour	90ème Jour	180ème Jour
						* 180ème Jour

Fumures	Accroissement de NH4 échangeable dans l'horizon A (cmol(+) kg-1)					
F2-F1	0,27	0,37	0,67	0,14	0,02	* 0,08
F3-F1	0,07	0,38	0,66	1,00	0,05	Moyennes * 0,11
F4-F1	0,01	0,21	0,64	0,18	0,06	* 0,13

	Accroissement de NH4 échangeable dans l'horizon B (cmol(+) kg-1)					
F2-F1	-0,12	0,09	0,12	0,12	0,06	* 0,08
F3-F1	-0,12	0,08	0,42	0,65	0,20	Moyennes * 0,11
F4-F1	-0,13	0,25	0,59	0,92	0,25	* 0,13

	Accroissement de NH4 échangeable dans les modèles (mmol(+)/modèle)					
F2-F1	0,50	1,06	1,86	0,53	0,14	* 0,20
F3-F1	-0,01	1,07	2,28	3,48	0,43	Moyennes * 0,28
F4-F1	-0,17	0,90	2,49	1,83	0,53	* 0,33

Calcium (tabl.29): L'accroissement de Ca échangeable dû à l'apport de paille est maximum dès le premier jour dans l'horizon A et vers le quinzième jour dans l'horizon B. La diminution de Ca^{2+} provenant de l'apport de paille est plus progressive et moins poussée que pour Mg^{2+} dans l'horizon A. Par contre dans l'horizon B, la décroissance de Ca^{2+} est très marquée à partir du premier mois, maximum vers le troisième, et à peine moins marquée en fin d'expérience.

Sodium (tabl.30): L'accroissement des stocks de Na^+ dû à l'apport de paille n'est significatif que dans l'horizon A, pendant les quinze premiers jours. La dynamique de Na^+ échangeable est ensuite intermédiaire entre celle de Mg^{2+} et Ca^{2+} , c'est à dire qu'on observe une diminution des stocks de Na^+ échangeable par rapport aux modèles témoins (F₁) à partir du premier mois pour l'horizon B et du troisième mois pour l'horizon A.

Potassium (tabl.30): Les effets de l'apport de paille sur les stocks de K^+ échangeable sont très différents, en ce sens que dès les premiers jours l'accroissement des stocks de K^+ dans les horizons A sont relativement importants, puis ils décroissent ensuite très lentement. L'accroissement des stocks de K^+ échangeable dans les horizons B est plus tardif (troisième mois). Par conséquent, dans l'ensemble des modèles, l'apport de paille a provoqué un enrichissement en K^+ échangeable, qui décroît lentement, mais reste encore positif au sixième mois.

Ammonium (tabl.31): L'effet de l'apport de paille sur les stocks d'ammonium échangeable est plus tardif, avec un accroissement maximum des stocks de NH_4^+ échangeable, qui n'intervient que vers la fin du premier mois dans les horizons A, et au troisième mois dans l'horizon B. Par contre la décroissance des stocks de NH_4^+ échangeable, provenant de la paille, au cours des derniers mois est plus poussée que pour les stocks de K^+ échangeable surtout dans les horizons A, et l'enrichissement des modèles en ammonium échangeable en fin d'expérience est très modeste.

Au total, les effets de l'enfouissement de paille de luzerne sur les stocks de cations basiques échangeables sont très divers suivant les différents cations, mais l'enrichissement des horizons A et B des modèles apparait comme essentiellement transitoire, et l'on observe même un certain appauvrissement en bases échangeables de l'horizon B des modèles enrichis en paille. La question qui se pose est :
Quel est le devenir des cations basiques échangeables qui ont disparu ?

L'analyse des bases exportées dans les percolats, devrait nous permettre de répondre partiellement à cette question, et d'établir un bilan de la lixiviation des cations, notamment du magnésium, d'un horizon dans l'autre et hors des modèles, et de la fixation, en particulier du potassium sous forme non-échangeable dans les horizons A et B des modèles.

2.4. ELUVIATION DES BASES ET BILAN CATIONIQUE DES MODELES

=====

2.4.1. BASES RECUEILLIES DANS LES PERCOLATS

Les concentrations en cations des percolats recueillis au cours des différentes périodes d'incubation varient beaucoup plus que les teneurs en bases échangeables dans les horizons des modèles. On observe aussi une dispersion très inégale des résultats d'une répétition à l'autre, qui paraît liée à des vitesses de percolation différentes, notamment vers le trentième jour, spécialement pour les modèles (F₃) et (F₄) fortement enrichis en paille de luzerne. Il en résulte que les estimations des bases éluviées, réalisées à partir des moyennes des concentrations des percolats rassemblés par période d'incubation, ne donne une bonne idée des cinétiques de lixiviation des bases dans les divers modèles que pendant les quinze premiers jours et au cours des trois derniers mois. Par contre, entre le quinzième et le trentième jour, les flux de bases alors maxima, diffèrent parfois très fortement d'un modèle à l'autre. Ces différences sont en partie compensées par la suite, et les flux moyens cumulés fournissent donc une représentation à peu près objective et cohérente de l'éluviation des bases hors des différents modèles.

FLUX HEBDOMADAIRES:

Les flux hebdomadaires moyens de bases recueillis dans les percolats diffèrent suivant: les cations, les doses de paille ajoutées dans l'horizon A des modèles, les périodes d'incubation, et le type de modèle (A+B ou A seul).

Pour les modèles (A+B), les flux hebdomadaires moyens de bases lixiviées (SB = Ca+Mg+K+Na) sont limités au cours du ressuyage initial, et des quinze premiers jours. Ils s'accroissent brutalement pendant la deuxième quinzaine. Au cours des cinq mois suivants, les flux hebdomadaires moyens pour l'ensemble des cations décroissent rapidement, puis restent à peu près constants.

Pour les modèles (A), les flux hebdomadaires moyens de bases lixiviées (SB) sont maximum dès le premier jour (ressuyage) et pendant la première quinzaine. Ils décroissent fortement au cours de la deuxième quinzaine, et deviennent très faibles au cours des trois derniers mois.

FLUX CUMULES:

Au total (fig.19), pendant les quatre premiers mois, les flux moyens cumulés de bases éluviées à partir des modèles (A) sont un peu plus élevés que pour les modèles (A+B); mais c'est l'inverse qui se produit au cours des derniers mois. L'horizon B retarde donc globalement la lixiviation des cations en début d'incubation; mais en fin d'expérience, la somme des bases éluviées dans les modèles (A+B) est un peu plus élevée que dans les modèles (A sans B).

Lorsque l'on examine les flux cumulés pour chacun des cations (fig.20 à 21), on s'aperçoit que la cinétique d'éluviation du potassium diffère totalement de celle des autres cations. La lixiviation de K est très faible au cours des deux premiers mois dans les modèles (A+B) et connaît son maximum au cours des trois derniers mois (fig.22). Au contraire, dans les modèles (A), les percolats sont riches en

FIGURE 19

Somme des bases (Ca,Mg,K,Na) recueillies dans les percolats

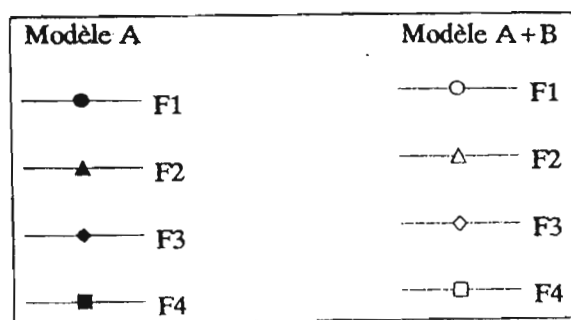
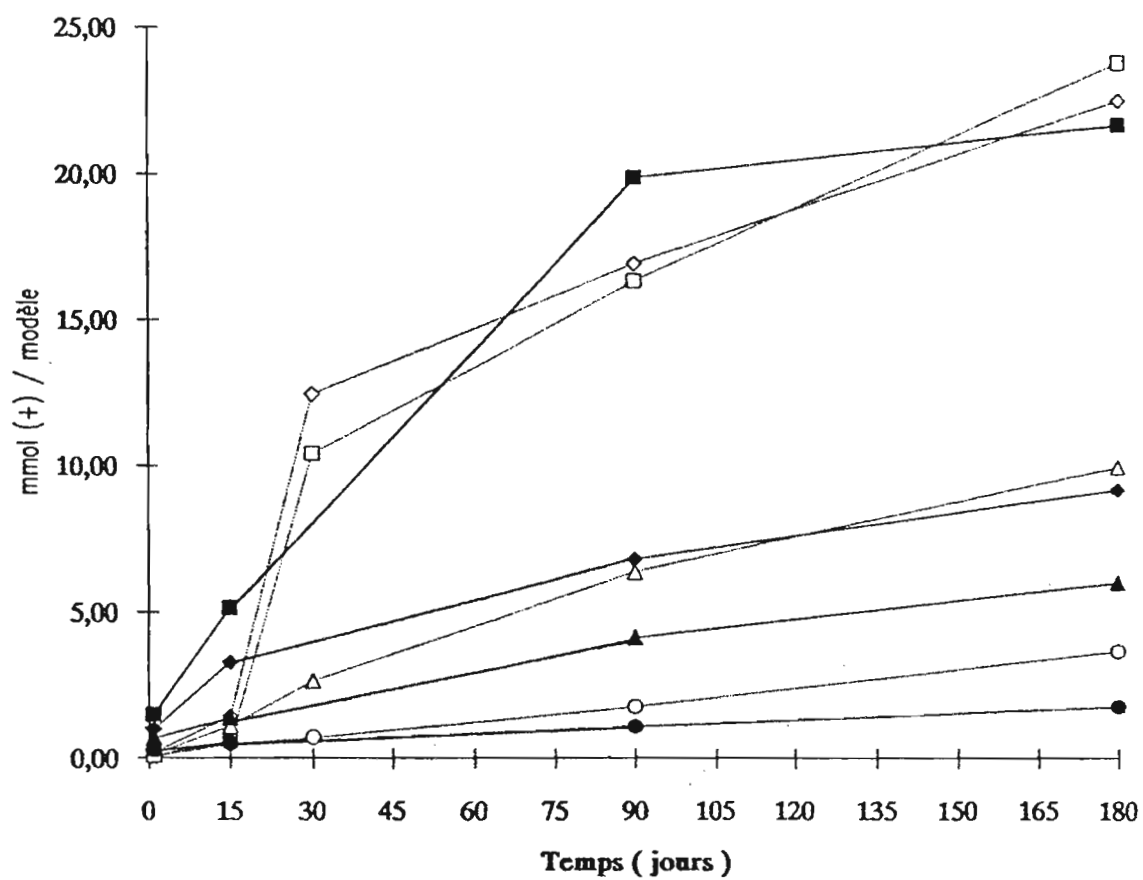


FIGURE 20

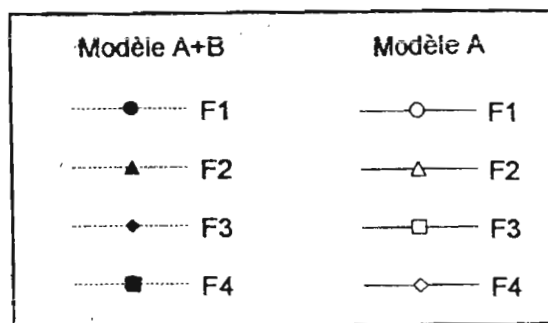
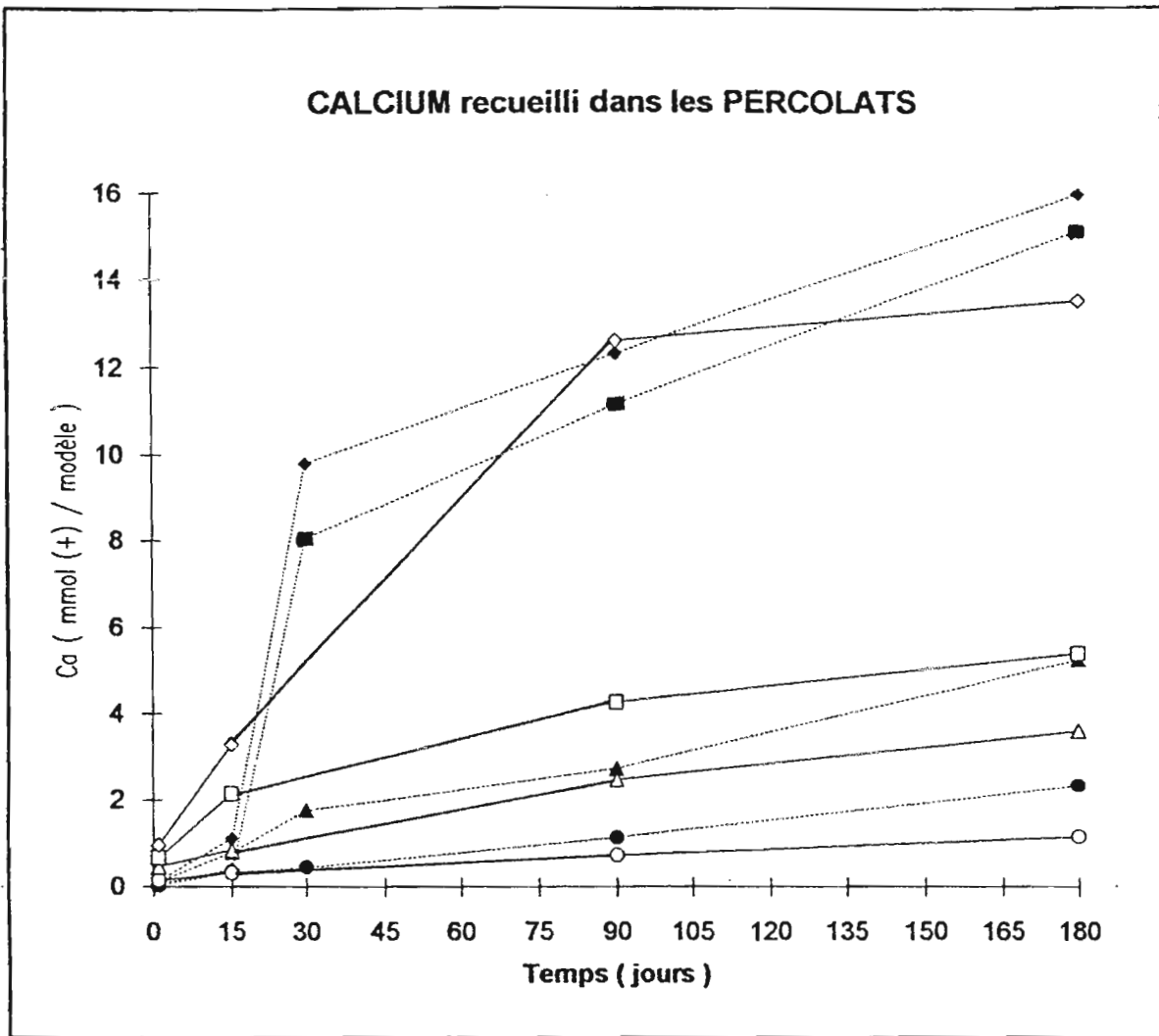


FIGURE 21

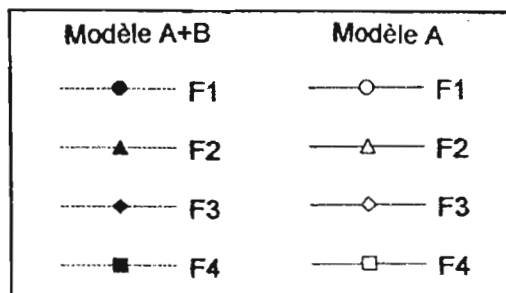
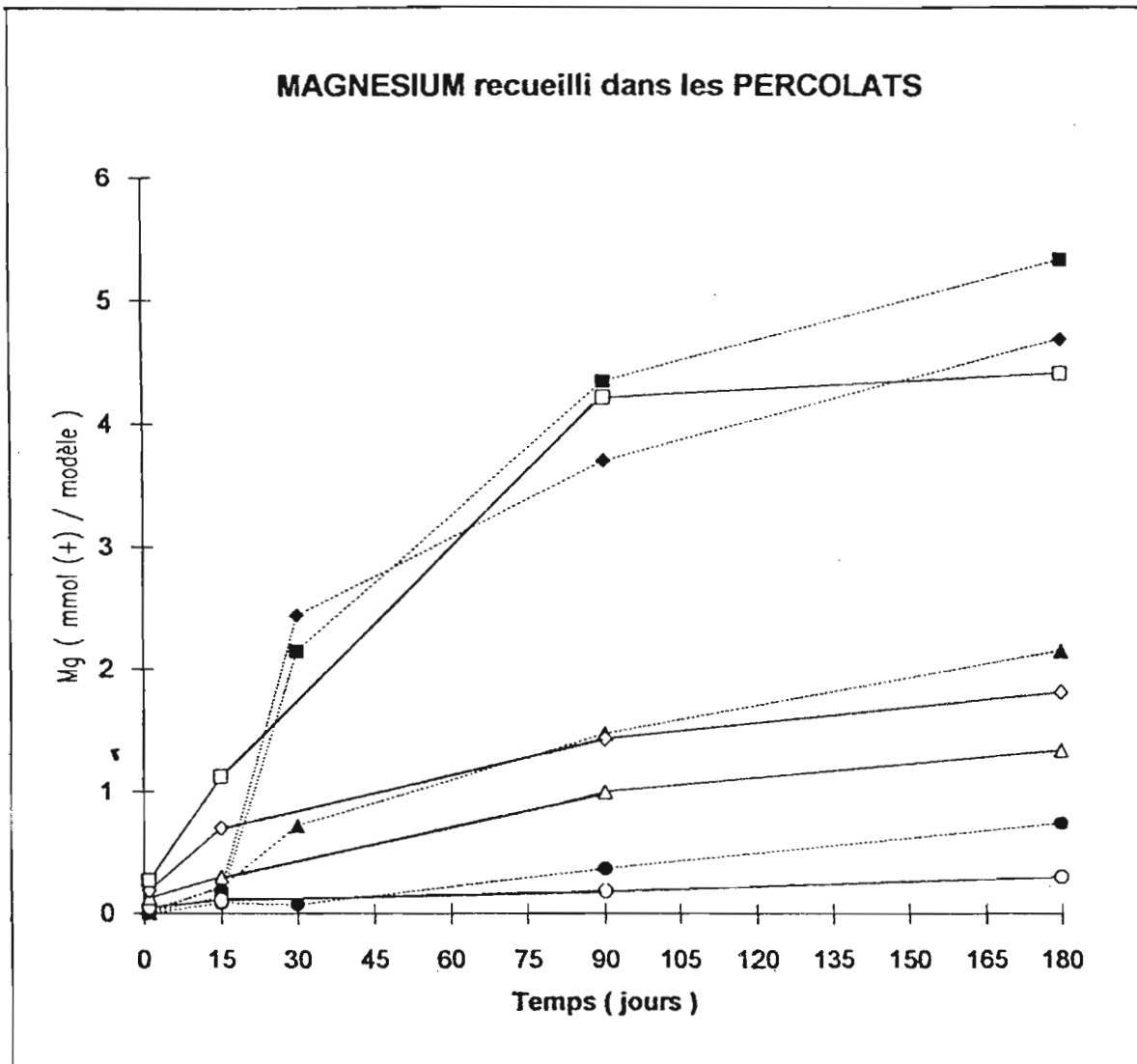
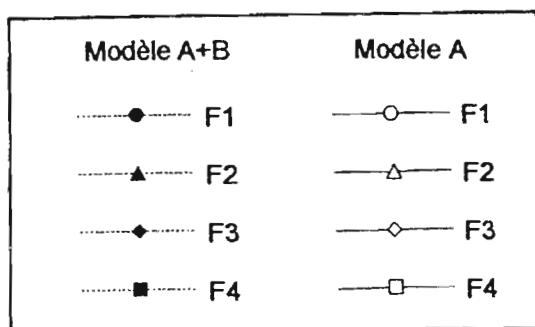
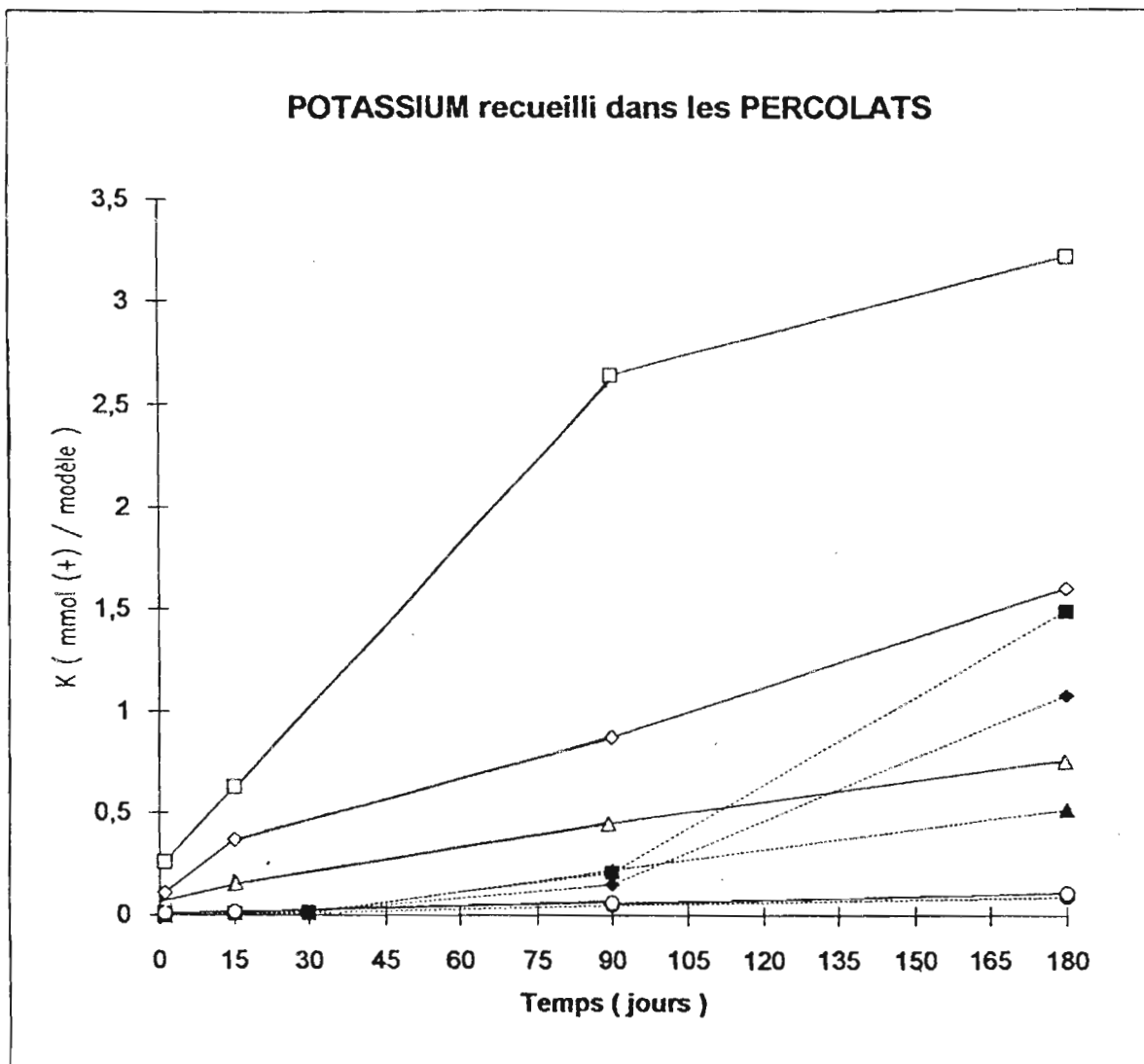


FIGURE 22



potassium dès le premier jour (ressuyage), et le flux hebdomadaire moyen est maximum pendant la première quinzaine. Il se maintient ensuite à un niveau plus élevé que pour les modèles (A+B); si bien que contrairement aux cinétiques observées pour les autres cations, , pour les mêmes doses de paille ajoutées, les totaux cumulés du potassium lixivié en fin d'expérience dans les modèles (A) sont nettement supérieurs au potassium recueilli sous les modèles (A+B). Nous verrons que ce phénomène s'explique par une fixation de K sous forme non-échangeable qui est nettement plus marquée dans les modèles (A+B).

2.4.2. RELATIONS ENTRE LES BASES APORTEES PAR LA PAILLE ET LES CATIONS

RECUEILLIS DANS LES PERCOLATS:

Dans les modèles témoins (F_1), c'est à dire sans apport de paille, les pertes de cations lixiviés au cours des six mois d'expérience sont peu importantes. Pour Ca, Mg, et Na, elles sont nettement plus faibles dans les modèles (A) que dans les modèles (A+B). Comme les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ échangeable de l'horizon B de ces modèles ne décroissent pas significativement, on peut penser que plus de la moitié des cations éluviés proviennent de cations initialement présents sous forme non-échangeable dans l'horizon B de ces modèles.

C'est l'inverse pour le potassium; c'est à dire que pour les modèles (F_1), le total cumulé de potassium lixivié est quatre fois plus élevé dans les modèles (A) que dans les modèles (A+B). Comme les teneurs en potassium échangeable n'augmentent pas significativement dans l'horizon B de ces modèles, on est conduit à supposer qu'il y a illuviation d'une certaine quantité de K qui se fixe ou est rétrogradée dans l'horizon B des modèles (F_1), non-enrichis en paille.

Pour les modèles (F_2), (F_3) et (F_4), on peut estimer l'influence de l'apport de paille sur la lixiviation des cations, en retranchant pour chaque période d'incubation les cations lixiviés dans les modèles (F_1) (cf. annexe 24). Dans les percolats recueillis sous les modèles (A+B), les pourcentages des bases qui sont lixiviées, par rapport aux bases apportées par la paille sont très faibles pendant les quinze premiers jours. Ils s'accroissent entre le premier et le troisième mois. En fin d'expérience, ils dépassent 50% des bases apportées par la paille.

Il est à noter que la lixiviation des bases dans les modèles (A) enrichis en paille est plus précoce, mais les pourcentages des bases lixiviées par rapport aux bases apportées par la paille sont moins élevés pour (F_2-F_1) et (F_3-F_1). Ceci confirme l'éluviation de bases dans l'horizon B des modèles dont l'horizon A a été enrichi en paille.

On constate que les pourcentages des éléments lixiviés par rapport à ceux apportés par la paille, diffèrent fortement d'un cation à l'autre, et donc par rapport à la somme des bases (SB). Pour les modèles (A+B), ces pourcentages de bases apportées par la paille qui sont lixiviées sont nettement plus élevés pour Ca (annexe 20) et ils dépassent même 100% pour Mg à partir du troisième mois (annexe 21). C'est à dire que le magnésium recueilli dans les percolats ne provient pas seulement de la paille ajoutée, mais aussi des sols placés dans les horizons A et B des modèles.

Les pourcentages de K lixivié sont pratiquement nuls pendant le premier mois, et très faibles pendant les deux mois suivants. Ils ne

FIGURE 23

BILAN DE Ca APPORTE PAR LA PAILLE

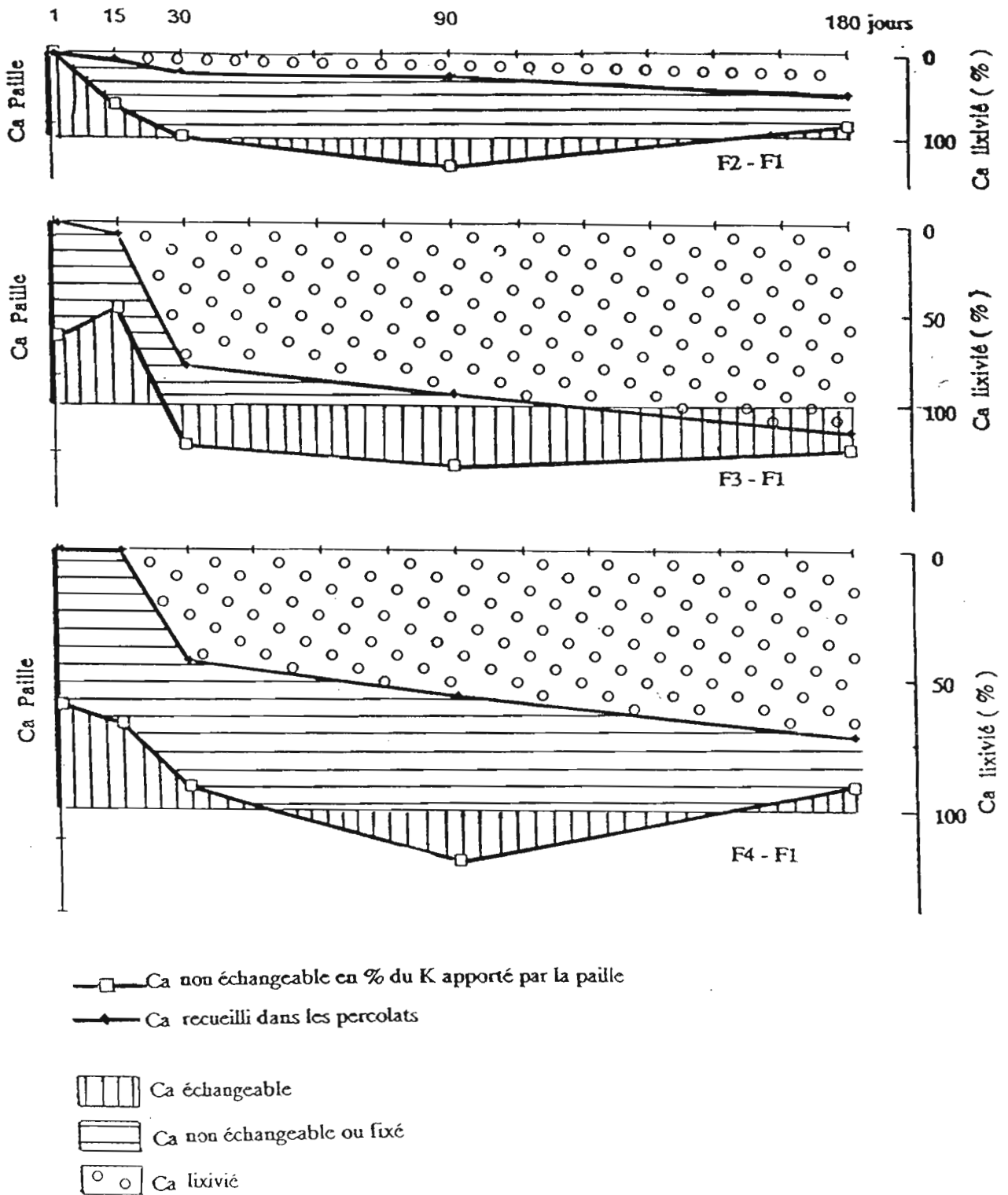
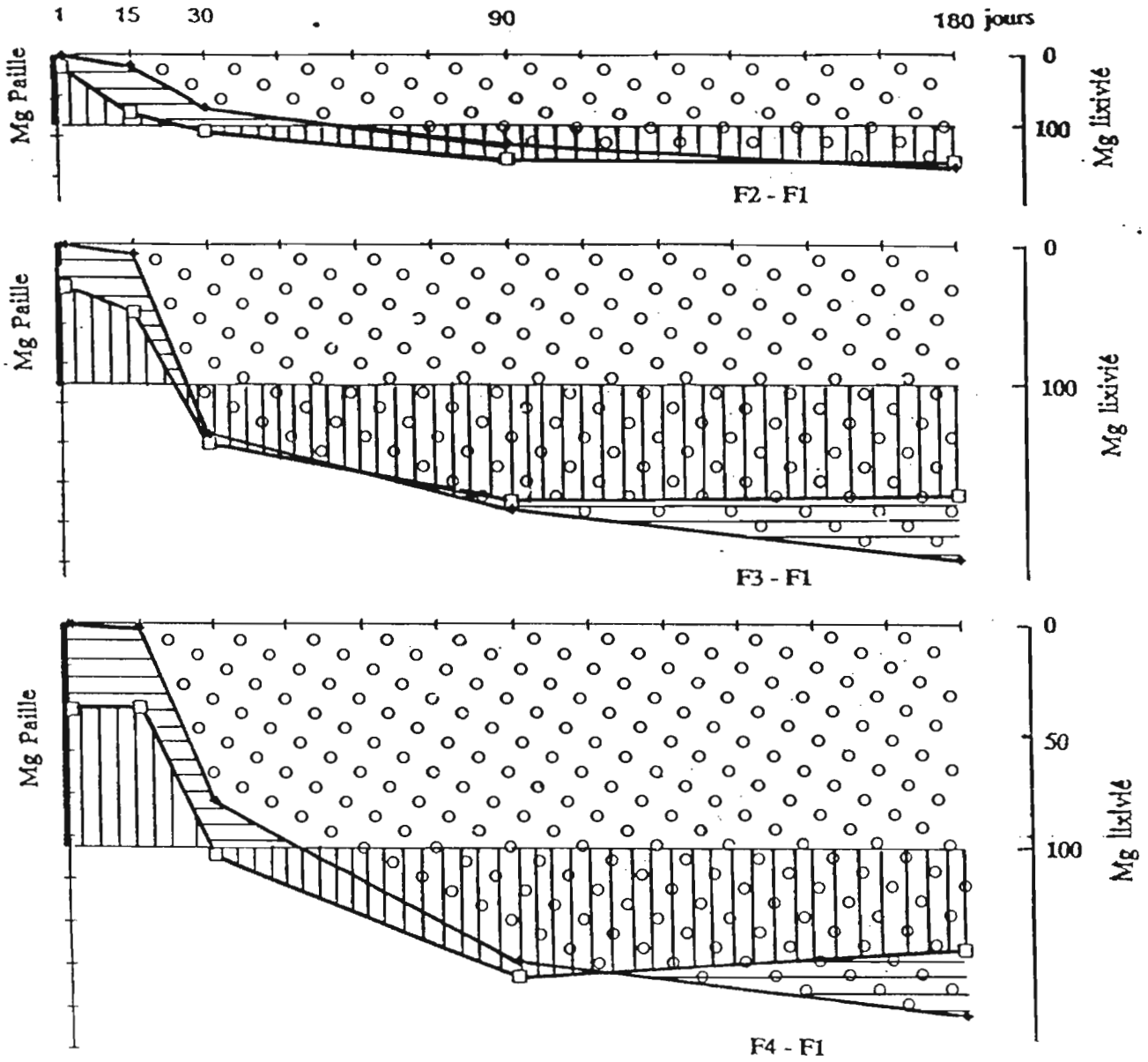


FIGURE 24

BILAN DE Mg APPORTE PAR LA PAILLE



—□— Mg non échangeable en % du K apporté par la paille

—◆— Mg recueilli dans les percolats

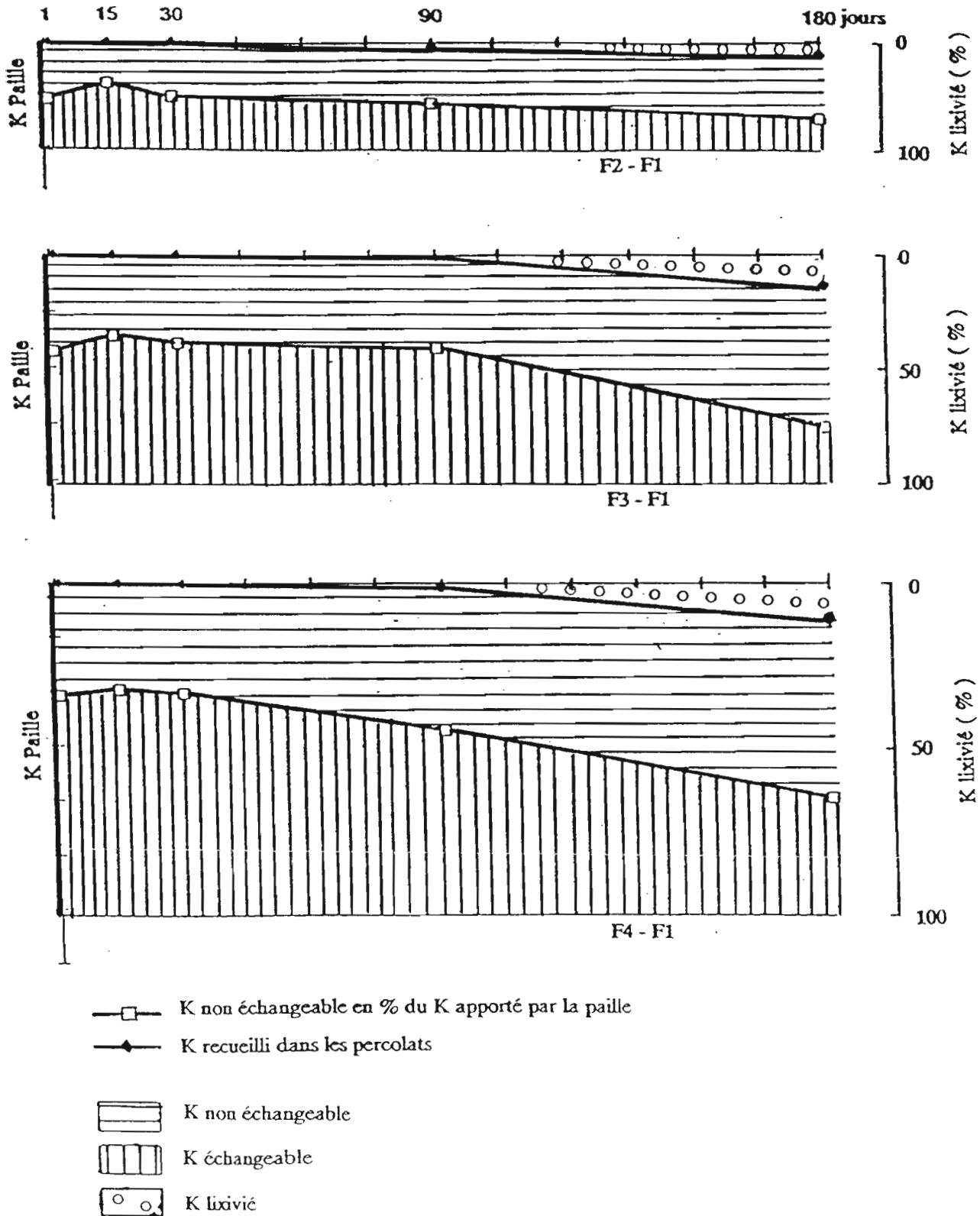
▤ Mg échangeable

▥ Mg non échangeable ou fixé

○ Mg lixivié

FIGURE 25

BILAN DE K APORTE PAR LA PAILLE



représentent guère plus de dix pour cent du potassium apporté par la paille en fin d'expérience (annexe 22).

Pour les modèles (A), les pourcentages de potassium lixivié s'accroissent plus précocement, et en fin d'expérience, ils sont deux à trois fois plus élevés que pour les modèles (A+B). Par contre les pourcentages de Ca et surtout Mg lixiviés sont un peu plus faibles dans les modèles (A) que dans les modèles (A+B).

Donc globalement, les pertes de bases par lixiviation représentent plus de 60% des bases apportées par la paille. Toutefois, 90% du potassium provenant de la paille restent dans les modèles (A+B). Inversement l'excès du magnésium lixivié par rapport au Mg apporté par la paille incite à se demander si des réactions d'échange ou de fixation du potassium dans les modèles ne sont pas à l'origine de cette forte éluviation de Mg à partir des horizons A et B des modèles.

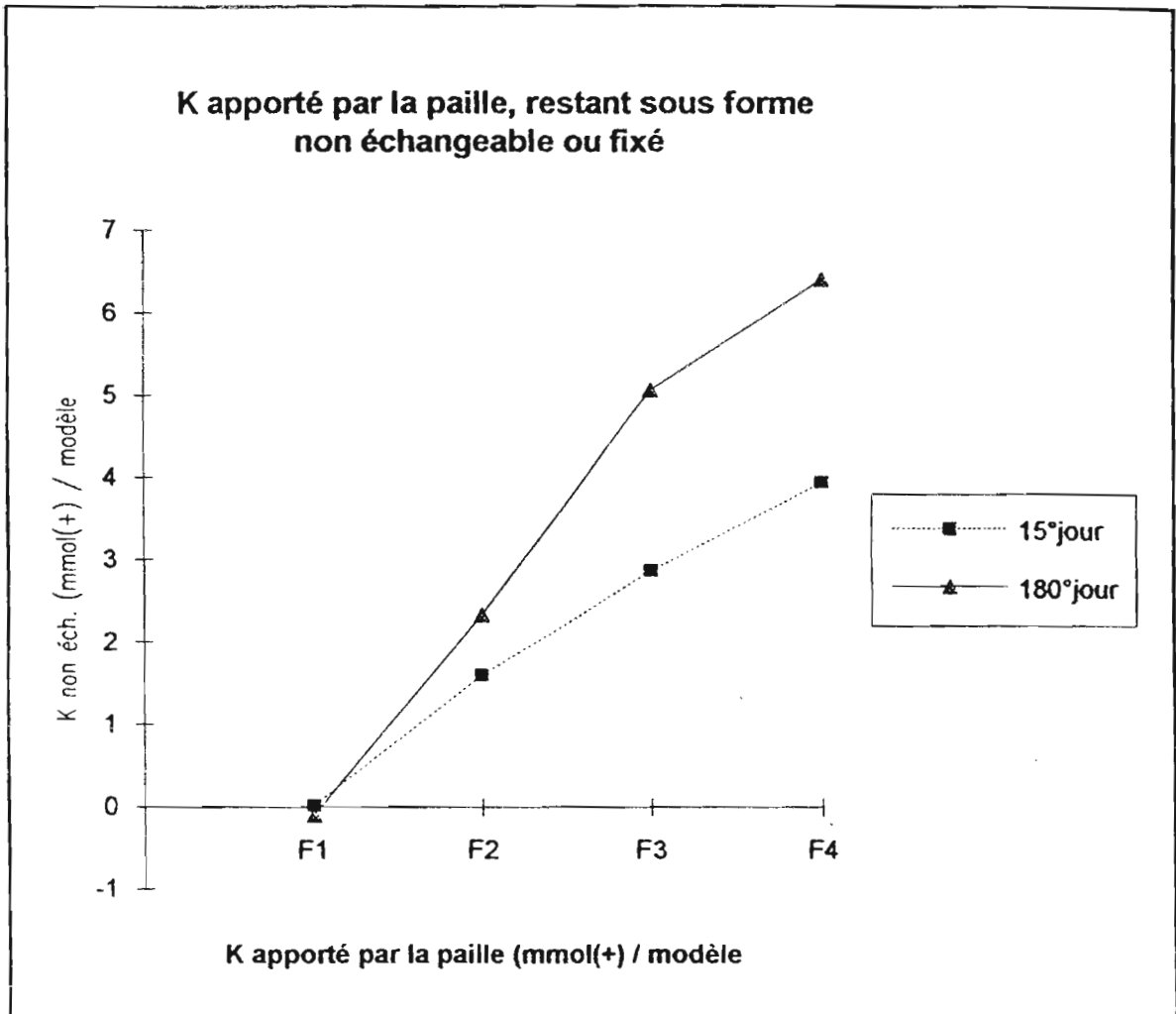
2.4.3. CATIONS SOUS FORME NON-ECHANGEABLE:

Nous avons précédemment rendu compte de l'effet de l'apport de paille enfouie dans l'horizon A des modèles, d'une part sur la saturation par des cations échangeables du complexe adsorbant des horizons A et B des modèles, d'autre part sur les cations lixiviés qui sont recueillis dans les percolats. On peut donc tenter d'établir un bilan du devenir des bases apportées par la paille et estimer par différence avec les modèles (F_1) sans apport de paille, les bases qui restent ou qui passent sous une forme non-échangeable, ou inversement l'origine des bases lixiviées qui proviennent de la paille ou des sols de ces modèles, pour les trois doses de paille ajoutées: (F_2-F_1), (F_3-F_1) et (F_4-F_1). Les bilans successifs ont été établis séparément pour chaque cation (annexes 20 à 24), en supposant que les teneurs en cations non-échangeables sont égales à la différence entre d'une part les bases apportées par la paille, et d'autre part les bases lixiviées plus l'accroissement des teneurs en bases échangeables des horizons des modèles.

Pour l'ensemble des modèles (A+B), les pourcentages de Ca et Mg non-échangeable qui proviennent de la paille sont maximum dès les premiers jours (fig.23 et 24). Le bilan paraît indiquer que Ca et Mg non-échangeable décroissent nettement au cours des trois derniers mois. Ceci confirme que la lixiviation d'une certaine quantité de Ca et surtout de Mg dans les modèles enrichis en paille, se fait aux dépens des cations à l'état non-échangeable ou fixé, provenant de la paille ou des sols des deux horizons, au cours de la deuxième moitié des expériences.

Le potassium non-échangeable décroît faiblement au cours de la minéralisation de la paille pendant les quinze premiers jours (fig.26). Il s'accroît lentement mais plus fortement pendant les trois derniers mois. Il y a donc rétrogradation ou fixation d'une partie du potassium apporté par la paille.

FIGURE 26



FIXATION DU POTASSIUM:

Pour les modèles (F₁) sans apport de paille, on peut supposer qu'il y a au cours des trois derniers mois une légère baisse ou éluviation de potassium initialement sous forme non-échangeable, qui correspond à la somme du potassium recueilli dans les percolats, et du léger accroissement de K échangeable dans les horizons A et B de ces modèles. Cette libération de K fixé est nettement plus importante dans les modèles (A) que dans les modèles (A+B). Ceci semble indiquer qu'il y a refixation partielle dans l'horizon B du K libéré dans l'horizon A et lixivié dans ces modèles (F₁).

Pour les modèles (F₂), (F₃) et (F₄), le bilan (annexe 22) montre que le potassium sous une forme non-échangeable décroît légèrement au cours des quinze premiers jours. Il représente alors environ 40% du potassium apporté par la paille pour (F₂), 35% pour (F₃) et 1/3 pour (F₄). Nous constatons donc que dès le début de l'expérience, les quantités de potassium restant dans les modèles sous forme non-échangeable ne sont pas strictement proportionnelles aux doses de paille apportées. Au cours des mois suivants, l'accroissement des pourcentages de potassium non-échangeable dans ces trois modèles montre qu'il y a au contraire fixation (ou rétrogradation) d'environ 20% du potassium apporté par la paille dans les modèles (A+B). En fin d'expérience, tandis que les quantités de potassium recueillies dans les percolats représentent seulement un peu plus de dix pour cent du potassium apporté par la paille; celui qui reste dans les modèles sous forme non-échangeable s'est accru proportionnellement pour (F₂) et (F₃), mais plus faiblement pour la dose (F₄) (fig.26). Ce dernier résultat paraît indiquer que la capacité de fixation du potassium dans l'ensemble du modèle (A+B) doit être presque atteinte pour le traitement (F₄).

Si l'on suppose que les quantités de potassium recueillies dans les percolats des modèles (A) sont identiques aux flux de potassium lixivié dans l'horizon A des modèles (A+B), on peut tenter d'établir un bilan du potassium non échangeable ou fixé dans les deux horizons A et B des modèles (A+B) (annexe 25). Dans l'horizon A, on constate que le pourcentage de K non-échangeable par rapport à celui apporté par la paille décroîtrait fortement au cours des quinze premiers jours. Le potassium fixé dans l'horizon A s'accroîtrait ensuite d'abord faiblement, puis plus fortement au cours des trois derniers mois. Toutefois, l'estimation des teneurs en K non-échangeable en fin d'expérience montre que le processus de fixation du potassium dans l'horizon A n'augmenterait que faiblement entre les modèles (F₃) et (F₄).

Le pourcentage de potassium fixé dans l'horizon B par rapport au K apporté par la paille augmenterait progressivement pendant les trois premiers mois. Mais contrairement à ce que nous avons observé dans l'horizon A, les quantités fixées dans l'horizon B des modèles (F₄) seraient beaucoup plus élevées que dans les modèles (F₂) et (F₃). C'est à dire que pour la dose (F₄), lorsque la capacité de fixation de l'horizon A est atteinte, l'excès de potassium se fixerait dans l'horizon B. Au cours des trois derniers mois, les quantités de K fixées dans l'horizon B décroîtraient sensiblement pour les trois doses de paille apportées. Les cinétiques de fixation du potassium et de l'ammonium dans l'horizon B des modèles seraient donc analogues.

TABLEAU 32

BILAN DES BASES DANS LES MODÈLES

$$\Delta M_{\text{paille}} = \Delta M_{\text{lix.}} + \Delta M^{\text{+ éch.}} + \Delta M_{\text{non-éch.}}$$

Ca	+++++	=	+++++	-	ε
Mg	++	=	++++	ε	—
K	++++	=	ε	+	+++

ΔM = différence de M avec modèle témoin (sans paille) : $(M_x - M_t)$

M_{paille} = Base M contenue dans la paille enfouie dans l'horizon A (t=0)

$M_{\text{lix.}}$ = Quantité cumulée (à l'instant t) de Base lixiviée dans percolats

$M^{\text{+ éch.}}$ = Cation sous forme échangeable dans modèle (à l'instant t)

$M_{\text{non-éch.}}$ = Base non-échangeable ou fixée dans modèle (à l'instant t).

Les cinétiques d'évolution du potassium non-échangeable dans l'horizon A seraient par contre très différentes de celles de l'ammonium fixé dans cet horizon, puisque pratiquement inversées.

Il faudrait confirmer par une méthode analytique adaptée qu'environ 60% du potassium apporté par la paille, reste dans les modèles sous une forme non-échangeable. Nous avons essayé de mettre au point pour mesurer le potassium fixé, une technique analytique par attaque HCl-HF, après destruction des matières organiques par l'hypobromite de sodium et extraction de K échangeable par NH_4Cl ; mais cette méthode s'est révélée insuffisamment précise pour ces sols riches en potassium total (minéraux micacés et feldspath orthose).

Ces expériences ont mis en évidence l'éluviation de quantités notables de magnésium non-échangeable à partir des minéraux argileux contenus dans les modèles (fig.24). On est évidemment tenté de rapprocher les deux processus opposés de libération de Mg et de fixation de K, qui paraissent à peu près simultanés (tabl.32); tandis que le déficit de charge dû à des substitutions isomorphiques est réduit, comme l'indique la diminution de la capacité d'échange cationique en particulier de l'horizon B.

2.5. LESSIVAGE DES SESQUIOXYDES

=====

Les percolats recueillis à la base des modèles enrichis en paille de luzerne, sont peu colorés au cours des premiers jours; mais à partir du quinzième jour pour les modèles A et de trois semaines pour les modèles (A+B), ils ont une couleur jaune à ocre-jaune (tabl.33) particulièrement pour les doses (F₃) et (F₄). Nous avons vu que ces percolats colorés contiennent alors des quantités relativement importantes de carbone organique soluble ou pseudo-soluble provenant de la décomposition de la paille. Pendant environ un mois, les percolats recueillis sont plus ou moins colorés ; puis la couleur des percolats redevient très claire à partir du deuxième ou du troisième mois d'incubation.

2.5.1. DYNAMIQUE DU FER DANS LES MODELES

MOBILISATION DU FER

Vers la fin du premier mois, des précipités de couleur ocre-rouille apparaissent sous forme d'anneaux horizontaux de un à deux millimètres d'épaisseur autour de l'horizon B des modèles, dans le tampon de laine de verre placé à la base des colonnes, ou même dans les erlenmeyers dans lesquels s'écoule goutte à goutte les percolats. Toutefois, l'examen macroscopique de l'horizon B après démoulage a montré que les dépôts ferrugineux en forme d'anneau, sont superficiels et localisés au contact de l'allonge de verre. Dans la masse des horizons A et B, il n'y a pas de ségrégation de couleurs, sous forme de taches ou d'amas localisés (ocre-rouille ou gris bleuté), attribuables à une redistribution du fer ou à la présence de formes réduites. Néanmoins nous avons vu (tabl.27) qu'il existe une augmentation des teneurs moyennes en fer dit "libre" (extrait par le réactif de Tamm pH:3) dans l'ensemble de l'horizon B des modèles (F₄). Cette augmentation des teneurs en oxydes de fer faiblement cristallisés ou ferrihydrite et de complexes organiques du fer (Blume 1988) est très significative à la fin du premier mois d'incubation, et plus faiblement marquée en fin d'expérience.

Cependant la forte odeur butyrique dégagée par les tubes enrichis en paille au cours de cette période d'incubation, et les pH de l'ordre de cinq des percolats recueillis au cours du premier mois (tabl.33), sous les modèles (A) fortement enrichis en paille, incitent à penser que la solubilisation du fer qui intervient, est due principalement à la formation de complexes de fer, principalement à l'état Fe(III), avec des polyacides organiques provenant de la décomposition de la paille. On sait (FISCHER 1990) que la microflore métabolisant facilement ces sels ou complexes organiques du fer et parfois d'ammonium est assez banale. La dégradation biologique de ces complexes par des bactéries hétérotrophes est rapide et il se forme un précipité brunâtre de ferrihydrite dès que les conditions d'aérobiose sont suffisantes (Dommergues 1960). La photographie des modèles à la fin du premier mois, montre que cette précipitation du fer est fonction des doses de paille de luzerne apportées.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL



Photo n° 1 : Lixiviation des matières organiques et du fer à la fin du premier mois d'incubation.



Photo n° 2 : Illuviation de ferrihydrite dans l'horizon B des modèles, dont l'horizon A a été enrichi en paille de luzerne.

TABLEAU 33

pH des PERCOLATS recueillis sous les modèles A + B

Périodes	1er Jour	1-15ème J.	1-30ème J.	1-60ème J.	60-90ème J.	90-180ème J.
Fumures	Ressuyage					
F1	6,6	8,2	8,0	8,3	8,4	7,5
		7,9	8,1	7,6	7,8	7,2
F2	8,1	8,1	8,1	8,4	8,2	7,4
		8,3	7,3	7,4	7,9	6,6
F3	8,0	8,1	jo. 7,7	jo. 6,6	jo. 7,5	5,3
		8,0	jo. 7,8	jp. 8,0	jp. 7,8	6,5
F4	7,6	7,8	jo. 7,9	jp. 7,7	jo. 7,3	7,4
		8,0	jo. 7,7	jp. 8,2	jp. 7,2	6,8

pH des PERCOLATS recueillis sous les modèles A

Périodes	1er Jour	1-15ème J.	15-30ème J.	30-90ème J.	90-180ème J.
Fumures	Ressuyage				
F1	6,0	5,5	5,4	-	5,3
		6,9	5,4	-	4,6
F2	5,5	jp. 8,2	jp. 5,7	7,0	5,5
		jo. 7,6	7,1	6,4	5,3
F3	7,7	r. 5,2	jo. 6,2	7,0	5,0
		jo. 8,2	jo. 8,3	7,0	4,8
F4	7,0	r. 5,1	r. 5,2	r. 5,3	6,4
		r. 5,4	-	r. 5,5	6,1

pH des PERCOLATS recueillis sous un modèle 0
(Sable quartzéux à la place des horizons A et B)

Périodes	1er jour	
Fumures	Ressuyage	
F1	-	: Couleurs des Percolats :
F2	7,6	: = incolore :
F3	7,4	: jp. = jaune pale :
		: jo. = jaune-ocre :
F4	6,7	: r. = ocre-rouille :

TABLEAU 34

Modèle A+B FER lixivie recueilli dans les percolats (micro-g Fe / colonne)						
----- Moyennes de Fe recueilli par périodes d'incubation -----						
Durées	1er Jour	2-15ème	16-30ème	30-90ème	91-180ème	Total
Fumures	Ressuyage	Jours	Jours	Jours	Jours	1-180ème J.
F1	51	45	5	132	364	597
F2	23	75	45	173	140	456
F3	101	105	1725	14676	381	16988
F4	29	53	4458	8026	165	12730

Modèle A Moyennes de Fe recueilli par périodes d'incubation						Fer de
-----						la paille
Durées	1er Jour	2-15ème	16-90ème	91-180ème	Total	ajouté dans
Fumures	Ressuyage	Jours	Jours	Jours	1-180ème J.	l'hor. A
F1	30	106	24	415	574	0
F2	843	2139	6557	232	9771	8140
F3	1381	8293	9142	396	19212	16280
F4	1613	13751	109709	1638	126709	24430

FER illuvié dans l' horizon B (micro-g /colonne)				
(Différences des flux cumulés recueillis sous modèles A et A+B)				
Fumures	1er Jour	15ème Jour	90ème jour	180ème Jour
F1	-21	39	-74	-23
F2	820	2884	9223	9315
F3	1280	9468	2209	2224
F4	1584	15282	112507	113980

FER RECUEILLI DANS LES PERCOLATS

Comme il n'a pas été possible d'évaluer quantitativement la cinétique de précipitation du fer sous forme d'hydroxydes faiblement cristallisés dans les modèles, l'analyse des percolats ne donne qu'une estimation par défaut de l'effet de l'apport de paille sur la solubilisation et la lixiviation du fer dans les différents modèles.

On constate (tabl.34) que les quantités de fer recueillies dans les percolats sous les modèles (A), sont relativement élevées pour les apports de paille (F_2) et (F_4), surtout aux alentours du 15^{ème} et du 30^{ème} jour. Pour ces modèles (A), les quantités de fer recueillies dans les percolats dépassent même nettement les quantités de fer apportées par la paille de luzerne.

Les maxima de lixiviation du fer hors des modèles (A+B) sont retardés d'environ quinze jours; et les quantités cumulées moyennes de fer recueillies dans les percolats sont nettement plus faibles que dans les modèles (A).

Bien que les percolats les plus riches en fer contiennent des quantités de carbone organique relativement importantes, les pertes de carbone par lixiviation sont généralement plus précoces que celles observées pour le fer. Par ailleurs les rapports Fe/C dans les percolats sont nettement plus faibles pour les modèles (A+B) que pour les modèles (A). Ceci confirme donc le processus d'illuviation du fer dans l'horizon B des modèles, dont l'horizon A est enrichi en paille.

ILLUVIATION DU FER DANS L'HORIZON B

Les quantités cumulées de fer recueillies dans les percolats sous les modèles (A) et sous les modèles (A+B) diffèrent surtout en début d'expérience. Le bilan du fer recueilli dans les percolats au cours de six mois d'incubation, montre que dans les modèles (A) le fer lixivié est supérieur au fer apporté par la paille de luzerne. Le fer illuvié dans l'horizon B peut être estimé comme étant égal ou supérieur à la différence du fer lixivié dans les modèles (A) et (A+B):

-Pour la dose de paille (F_2), la quantité de fer illuvié dans l'horizon B serait supérieure au fer apporté par la paille, et le fer lixivié hors des modèles (A+B) est très faible.

-Pour (F_3), le fer illuvié en fin d'expérience ne représente qu'un septième du fer apporté par la paille, toutefois on observe une illuviation beaucoup plus importante, mais transitoire, entre le quinzième et le 90^{ème} jour. Au 180^{ème} jour, le fer lixivié hors des modèles (A+B) est analogue au fer apporté par la paille.

-Pour (F_4), le fer illuvié représenterait cinq fois, et le fer lixivié la moitié, du fer apporté par la paille.

En résumé, ces expériences en modèles de laboratoire mettent en évidence la mobilisation relativement rapide de quantités importantes de fer de l'horizon A sous l'influence de la paille de luzerne enfouie dans cet horizon. Ce fer percole essentiellement sous forme de complexes organiques et la plus grande partie du fer lixivié est illuviée dans l'horizon B des modèles sous forme de fer complexé ou d'un précipité d'hydroxyde de Fe(III). L'horizon B des modèles, malgré sa faible épaisseur, limite donc les pertes de fer par lixiviation à des quantités inférieures aux quantités de fer apportées par la paille.

TABLEAU 35

Modèle A+B ALUMINIUM LIXIVIE recueilli dans les percolats :					
----- Moyennes de Al (mg / modèle) par périodes d'incubation :					
Durées	1er Jour	2-15ème	16-90ème	90-180ème	:: Total
	Ressuyage	jours	jours	jours	:: 1-180ème J. :
F1	0,088	0,908	1,445	2,090	:: 4,531 :
F2	0,193	1,740	2,329	3,112	:: 7,374 :
F3	0,329	2,295	5,505	3,746	:: 11,815 :
F4	0,161	1,028	6,402	3,877	:: 11,468 :
=====					
Modèle A Moyennes de Al (mg / modèle) par périodes d'incubation :					
Al apporté (paille)					
F1	0,450	0,265	0,133	1,116	:: 1,964 :
F2	1,988	0,524	0,803	1,483	:: 4,798 :
F3	3,044	1,522	3,887	1,818	:: 10,271 :
F4	3,819	2,307	8,397	3,171	:: 17,694 :
=====					
Aluminium illuvié dans l' horizon B (mg Al / modèle) :					
(Différence des flux cumulés recueillis sous les modèles A et A+B) :					
	1er Jour	15ème Jour	90ème jour	180ème jour::	
F1	0,362	-0,281	-1,593	-2,567	:: :
F2	1,795	0,579	-0,947	-2,576	:: Moyennes :
F3	2,715	2,002	0,384	-1,544	:: :
F4	3,658	4,937	6,932	6,226	:: :
=====					

2.5.2. DYNAMIQUE DE L'ALUMINIUM DANS LES MODELES

Les quantités d'aluminium apportées par la paille de luzerne sont cinq fois plus importantes que les quantités de fer. Néanmoins les quantités d'aluminium dit "libre" (réactif de Tamm pH:3) dans l'horizon A restent inchangées (tabl.27) et les doses d'aluminium recueillies dans les percolats sont faibles (tabl.35).

LIXIVIATION DE L'ALUMINIUM

Au cours des premiers jours d'incubation, les quantités d'aluminium recueillies dans les percolats sous les modèles (A) sont plus importantes que dans les percolats recueillis sous les modèles (A+B); mais très rapidement pour les modèles (F₁), à la fin du premier mois pour (F₂) et après le troisième mois pour (F₃), les quantités d'aluminium cumulées recueillies sous les modèles (A) et (A+B) sont du même ordre de grandeur. C'est seulement pour l'apport de paille le plus important (F₄) que les quantités d'aluminium lixiviées sous les modèles (A) restent supérieures à celles recueillies sous les modèles (A+B). Néanmoins les quantités d'aluminium lixiviées restent très nettement inférieures à l'aluminium apporté par la paille.

ILLUVIATION DE L'ALUMINIUM

L'horizon B retarde donc la lixiviation de l'aluminium, mais son illuviation dans l'horizon B, estimée par la différence des flux cumulés recueillis sous les modèles (A) et (A+B), est transitoire pour les modèles témoins (F₁), ainsi que pour les modèles (F₂) et (F₃). Elle reste significative en fin d'expérience pour les modèles (F₄). Nous avons vu (tabl.27), que l'aluminium extractible par le réactif TBK (tétraborate de potassium - potasse, pH:10) avait plus que doublé dans l'horizon B des modèles (F₄). L'aluminium illuvié dans cet horizon dont le pH est voisin de la neutralité serait donc principalement sous forme de complexe organique.

En résumé, l'enfouissement de paille de luzerne dans l'horizon A des modèles et le régime percolatif hebdomadaire, entraînent une mobilisation et une lixiviation beaucoup plus importante pour le fer que pour l'aluminium. De plus, l'illuviation de l'aluminium dans l'horizon B paraît plus transitoire et beaucoup moins importante que celle du fer. Dans les deux cas, les sesquioxides illuviés paraissent migrer et s'accumuler au moins en partie sous forme de complexes organiques. Au bout de six mois d'incubation, les pertes de sesquioxides recueillis dans les percolats sous les modèles A+B, sont inférieures aux sesquioxides apportés par la paille de luzerne enfouie dans l'horizon A des modèles. Par contre, la mobilisation du fer dans l'horizon A et son illuviation dans l'horizon B des modèles, constituent un phénomène spectaculaire, rapide et important, qui est lié aux conditions réductrices temporaires et/ou localisées, ainsi qu'à la formation de complexes organiques, suite à l'enfouissement de matières végétales dans l'horizon A de ce sol brun sur limons.

2.6. EVOLUTION DU pH DES HORIZONS A ET B EN RELATION AVEC LE TAUX ET LE DEFICIT DE SATURATION

A la suite de PEECH (1941), de nombreux auteurs se sont aperçus qu'il existait une relation statistique entre le pH et le taux, ou pourcentage de saturation du complexe adsorbant par des cations basiques échangeables, soit: $V = SBE/CEC$ (%). Pour des populations composites comportant de nombreux échantillons, cette relation entre le pH et le taux de saturation est plus ou moins étroite, mais généralement linéaire (BLOSSER et JENNY, 1971). Par contre la relation est curviligne, pour un même sol amendé avec différentes doses de calcaire ou de chaux, en raison des variations de la "capacité tampon" aux différents pH (BRADY 1991). Ce pouvoir tampon dépend des charges variables, en particulier de la dissociation éventuelle de groupements OH des argiles, mais surtout, pour ce sol brun forestier faiblement acide, des groupes fonctionnels carboxyle et hydroxyle des matières organiques, dont la dissociation s'accroît, lorsque le pH augmente.

Nous avons vu que la paille de luzerne apportée enrichit l'horizon A des modèles en cations basiques échangeables tout au moins en début d'incubation; mais le complexe adsorbant est aussi fortement accru par la capacité d'échange des débris végétaux et des matières organiques provenant de la décomposition de la paille enfouie dans l'horizon A. L'évolution de la saturation de la CEC des horizons des modèles par des cations basiques et acides est donc un phénomène complexe. Pour l'étudier au cours de l'expérience et en fonction des doses de paille apportées, on peut comparer les variations du taux de saturation par des cations basiques avec les mesures des pH (H₂O) et pH (KCl), c'est à dire de la concentration en protons de la solution du sol et des ions H⁺ échangeables.

2.6.1. EVOLUTION DU pH (H₂O et KCl) DES HORIZONS A ET B

Le pH (H₂O) rend compte de "l'acidité active", c'est à dire de l'activité des ions H⁺, ou plus exactement H₃O⁺, dans la solution du sol.

Le pH (KCl) correspond à "l'acidité d'échange" ou déplaçable par un sel non tamponné. Les cations acides (H⁺, Al³⁺, Al(OH)²⁺, Al(OH)₂⁺) présents sur les sites d'échange du complexe adsorbant sont échangés contre K⁺ et libérés dans la solution du sol. Par hydrolyse, ces cations acides donnent des protons.

pH de l'Horizon A (annexe 27)

Les pH dans l'eau et dans le KCl, 1M augmentent significativement d'environ une demi-unité pH, entre le premier et le quinzième jour, quelles que soient les doses de paille ajoutées dans l'horizon A (fig. 27 et 28). Par la suite le pH de l'horizon A n'augmente plus significativement en fonction du temps d'incubation; mais les pH (H₂O) et surtout (KCl) s'accroissent respectivement en moyenne de 0,4 et 0,7 unités pH, lorsque l'on passe des témoins sans paille (F₁) à la plus forte dose (F₄).

TABLEAU 36

Modèle A+B	EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR L'ACCROISSEMENT DU pH					Modèle A
-----	Différences avec le pH du modèle F1 (sans paille)					-----
Durées:	1er jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	180ème J.
=====						
Fumures	Accroissement du pH (H2O) de l'horizon A					
F2-F1	0,10	0,30	0,40	-0,15	0,20	0,25
F3-F1	0,15	0,40	0,40	0,40	0,25	0,45
F4-F1	0,15	0,35	0,55	0,25	0,50	0,40

	Accroissement du pH (KCl) de l'horizon A					
F2-F1	0,25	0,40	0,55	0,15	0,30	0,45
F3-F1	0,30	0,45	0,55	0,65	0,20	0,70
F4-F1	0,30	0,65	0,80	0,55	0,75	0,60
=====						
	Accroissement du pH (H2O) de l'horizon B					
F2-F1	-0,10	0,00	0,00	-0,35	-0,10	
F3-F1	-0,20	-0,05	-0,50	-0,40	-0,85	
F4-F1	0,05	0,00	-0,30	-0,60	-0,90	

	Accroissement du pH (KCl) de l'horizon B					
F2-F1	0,00	0,25	0,10	-0,45	-0,20	
F3-F1	0,00	0,25	-0,20	-0,55	-0,90	
F4-F1	0,00	0,25	0,10	-0,65	-0,90	
=====						

Par conséquent, la concentration en protons dans l'horizon A décroît au cours des premiers jours, puis en fonction des doses de paille ajoutées dans cet horizon A.

pH de l'Horizon B (annexe 28)

Les pH (H_2O et KCl) de l'horizon B des modèles varient très différemment, puisqu'ils diminuent d'abord en fonction du temps d'incubation pendant près d'un mois; puis le pH des traitements (F_1) reste constant, tandis que pour les autres traitements, le pH décroît avec le temps d'incubation et d'autant plus que les doses de paille apportées sont plus fortes. Il existe donc une interaction très significative sur le pH de l'horizon B, entre les deux traitements: durées d'incubation \times doses de paille ajoutée dans l'horizon A.

EFFETS DES DOSES DE PAILLE AJOUTEES SUR LE pH DES HORIZONS A ET B

L'influence de l'apport de paille sur les pH (H_2O et KCl) peut être estimée par la différence de pH avec celui mesuré au bout du même temps d'incubation dans le même horizon, du modèle (F_1) sans apport de paille (tabl.36). On constate que les écarts (pH_2-pH_1), (pH_3-pH_1) et (pH_4-pH_1) s'accroissent significativement en début d'expérience, pendant un mois pour l' horizon A, et quinze jours seulement pour l'horizon B. Ensuite les différences de pH dans les horizons A décroissent, plus nettement pour (pH_2-pH_1) que pour les deux autres apports. Dans les horizons B, la décroissance des différences de pH (H_2O ou KCl) est beaucoup plus forte. (pH_2-pH_1) présente un minimum au troisième mois, tandis que (pH_3-pH_1) et (pH_4-pH_1) continuent à décroître au sixième mois.

En résumé, les doses de paille (F_3) et (F_4) provoquent un accroissement du pH de l'horizon A des modèles qui se maintient à peu près jusqu'au sixième mois. Par contre l'accroissement de pH de l'horizon A, dû à la dose F_2 , disparaît vers le troisième mois. Les accroissements du pH des horizons B dus à l'apport de paille sont faibles et plus transitoires. Par la suite, la paille ajoutée provoque une diminution du pH qui devient de plus en plus importante en fonction des doses de paille apportées et du temps d'incubation.

2.6.2. RELATION ENTRE LE pH ET LE TAUX DE SATURATION DES HORIZONS A ET B

Horizon A

Dès le premier jour, le taux de saturation par des cations basiques de l'horizon A s'accroît très fortement en fonction des doses de paille apportées (annexe 29). Par contre les pH (H_2O) et pH (KCl) augmentent peu. Au quinzième jour, l'accroissement du taux de saturation est un peu plus faible, mais le pH a nettement augmenté pour l'horizon A des modèles témoins (F_1) et surtout pour les modèles enrichis en paille.

À partir de la fin du premier mois, l'accroissement du taux de saturation reste analogue pour chacune des doses de paille apportées, et les valeurs du pH restent à peu près constantes dans le temps. Les figures (27 et 28) montrent que les points représentatifs se regroupent alors, le long d'une droite, ce qui paraît indiquer qu'il existe une relation linéaire très hautement significative entre les valeurs du pH et les taux de saturation:

FIGURE 27

RELATION ENTRE LE TAUX DE SATURATION ET LE pH (H₂O)
dans l'horizon A des modèles

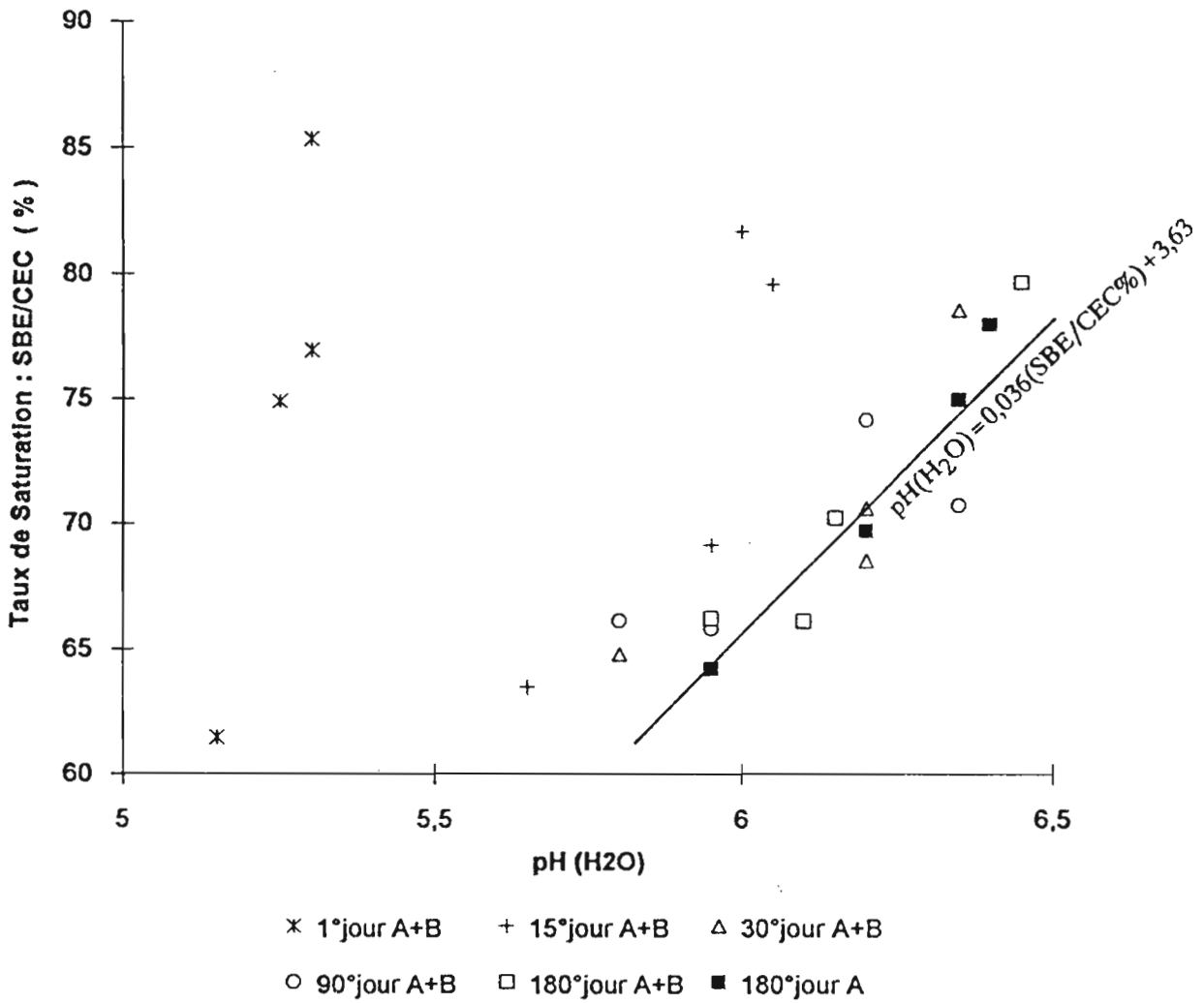
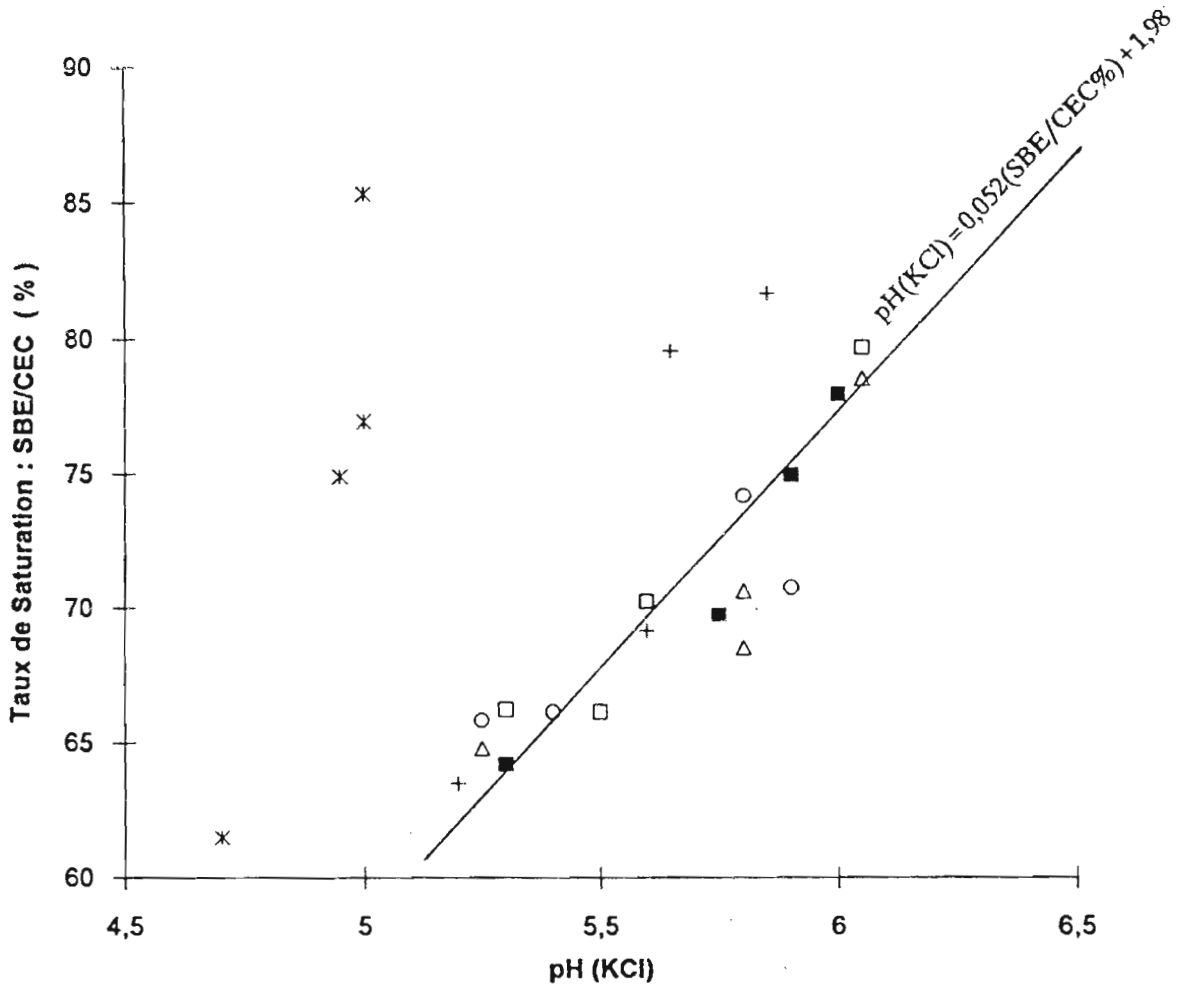


FIGURE 28

RELATION ENTRE LE TAUX DE SATURATION ET LE pH (KCl)
 dans l'horizon A des modèles



$$\text{pH (H}_2\text{O)} = 0,036 \times (\text{SBE/CEC } \%) + 3,63 \quad R^2=0,769 \text{ pour } 30 < t < 180 \text{ j}$$

$$\text{pH (KCl)} = 0,052 \times (\text{SBE/CEC } \%) + 1,98 \quad R^2=0,825 \text{ pour } 30 < t < 180 \text{ j.}$$

Il est à noter que au cours de ces cinq mois d'expérience, les pH (H₂O et KCl) restent étroitement liés:

$$\text{pH (H}_2\text{O)} = 0,673 \times \text{pH (KCl)} + 2,34 \quad R^2=0,900$$

c'est à dire que les variations de "l'acidité active" (ou de la solution du sol), qui sont dues à la paille enfouie, représentent les 2/3 des variations de "l'acidité d'échange".

Horizon B

L'apport de paille dans l'horizon A ne modifie pas le pH et le taux de saturation de l'horizon B en début d'incubation, si ce n'est une augmentation transitoire du taux de saturation vers le quinzième jour. Par contre à partir du troisième mois, le pH (H₂O), le pH (KCl) et le taux de saturation de l'horizon B des modèles diminuent fortement dans les modèles enrichis en paille de luzerne.

En résumé, l'enrichissement en résidus végétaux de l'horizon A des modèles, entraîne une nette augmentation du pH et de la saturation par des cations basiques du complexe adsorbant de cet horizon. Inversement il provoque une désaturation et une nette acidification de l'horizon B.

2.6.3. RELATION ENTRE LE pH ET LE DEFICIT DE SATURATION

Le déficit de saturation (DS = CEC-SBE), a été estimé par la différence entre la capacité d'échange cationique mesurée à pH : 7 et la somme des bases (ou des cations basiques) échangeables évaluée au même pH (annexe 30). DS rend compte globalement des sites d'échange, qui pour ces sols faiblement acides, sont porteurs de cations échangeables acides (protons, ions aluminium ou fer hydroxylés adsorbés) et de l'H liés aux matières organiques et à certains minéraux argileux par des liaisons covalentes (BRADY 1990), qui peuvent être libérés sous formes d'ions H⁺ lorsque le pH augmente, ici à pH:7.

EVOLUTION DU DEFICIT DE SATURATION DANS LES HORIZONS A ET B

Horizon A:

On constate que les valeurs moyennes du déficit de saturation de l'horizon A des modèles témoins (F₁) décroissent légèrement au cours des six mois d'expérience. Par contre dans les modèles avec apport de paille, le déficit de saturation du complexe adsorbant de l'horizon A est nettement réduit dès le premier jour, mais il augmente au cours des trois premiers mois, et devient à peine inférieur au déficit de saturation des modèles (F₁) pendant les trois derniers mois, sauf pour les modèles (F₄).

On observe donc successivement dans les modèles (F₂), (F₃) et (F₄), une phase de saturation par des cations basiques d'un complexe adsorbant nettement accru par l'apport de paille en tout début d'expérience, puis une phase de désaturation du complexe adsorbant de l'horizon A au cours des trois premiers mois. Ensuite le déficit de saturation de l'horizon A reste à peu près constant.

Horizon B:

Le déficit de saturation de l'horizon B des modèles (F_1) décroît légèrement au cours de l'incubation. Pour les modèles (F_4), il devient très faible au quinzième jour, mais s'accroît fortement par rapport au modèle témoin à partir du troisième mois.

L'apport d'une forte dose de paille dans l'horizon A provoque donc des variations en sens inverse d'une part des teneurs en K^+ et NH_4^+ échangeables et d'autre part de Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ échangeables dans les horizons B de ces modèles, qui ne se compensent qu'en partie. Il en résulte pour les modèles (F_4), une saturation du complexe adsorbant de l'horizon B vers le quinzième jour et une désaturation partielle, mais très significative de cet horizon à partir du troisième mois.

Par conséquent pour les modèles dont l'horizon A est enrichi en paille, les solutions qui percolent l'horizon B à partir du premier mois, ont un effet net globalement lixiviant sur les cations basiques contenus dans cet horizon B.

Ensemble des modèles (A+B)

Compte tenu des poids de sol placés dans l'horizon A (250g) et l'horizon B (150g) des modèles, il est possible d'estimer l'évolution des déficits de saturation dans l'ensemble des modèles ($mmol(+)$ / modèle). On constate que sans apport de paille (modèles F_1), DS_1 décroît progressivement de 20% au cours des six mois d'incubation par suite de la lixiviation des cations basiques.

Pour les modèles (F_4), DS_4 est égal à la moitié de DS_1 le premier jour. DS_4 s'accroît et devient identique à DS_1 au troisième mois, puis il décroît un peu plus fortement que DS_1 au cours des derniers mois d'incubation.

Après une brève phase d'illuviation de cations basiques dans l'horizon B des modèles enrichis en paille, on observe donc une phase d'éluviation des cations basiques et/ou de désaturation ou d'illuviation de cations acides, qui est amplifiée par l'enfouissement de matières végétales dans les modèles.

EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR LE DEFICT DE SATURATION DES MODELES

Comme pour les cations basiques échangeables, on peut évaluer (tabl.37) l'effet de l'apport de paille sur l'accroissement du déficit de saturation en retranchant les valeurs moyennes des déficits de saturation (DS_1) mesurées dans les modèles témoins (F_1) aux valeurs mesurées au même instant, pour les autres traitements: (DS_2-DS_1), (DS_3-DS_1) et (DS_4-DS_1).

Dès les premiers jours, on observe une diminution nette du déficit de saturation dans l'horizon A, qui est due à l'apport de paille. Cette diminution du déficit de saturation s'atténue progressivement. Vers le troisième mois, l'effet de l'apport de paille sur le déficit de saturation de l'horizon A est alors très faible. Il diminue légèrement, au cours des derniers mois, sauf pour (DS_3-DS_1).

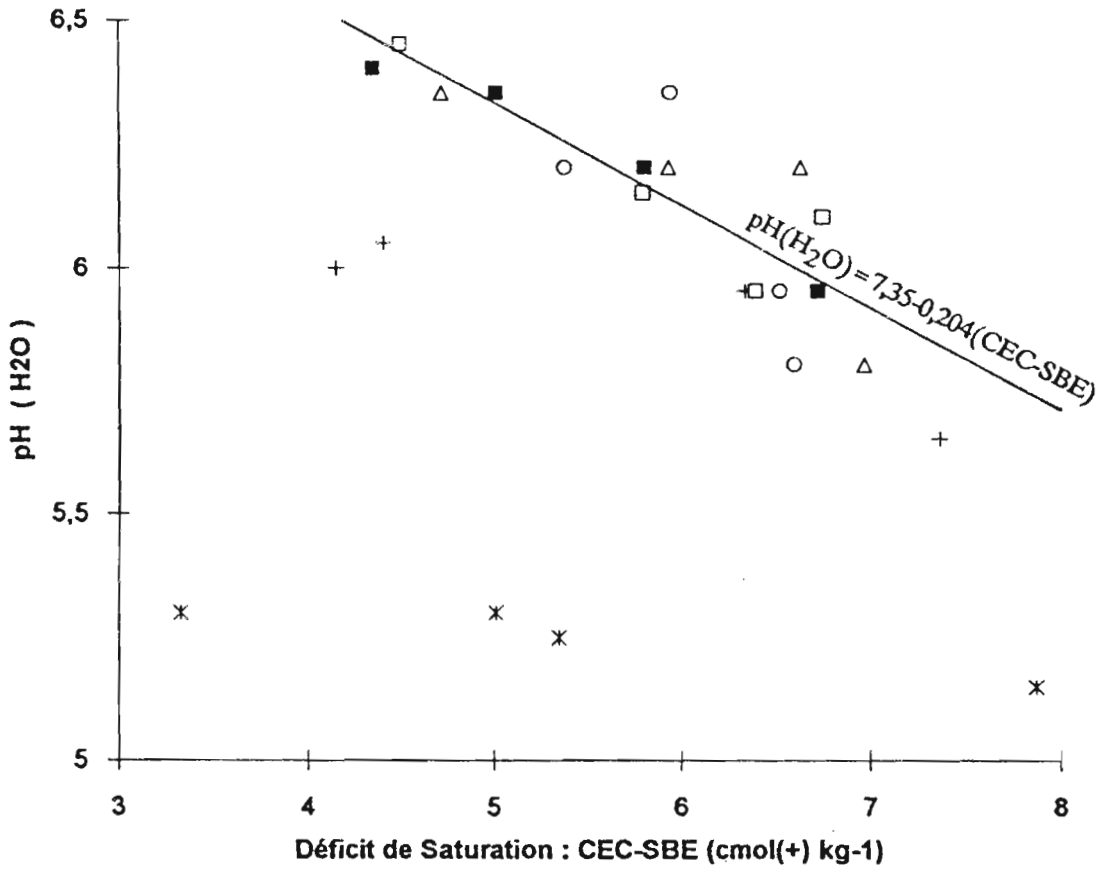
Dans l'horizon B, la diminution maximale du déficit de saturation due à la paille apportée dans l'horizon A est surtout marquée vers le quinzième jour. Cette diminution s'atténue ensuite, et l'effet de l'apport de paille provoque même un accroissement net du déficit de saturation à partir du troisième mois.

TABLEAU 37

Modèle A+B	EFFETS DE L'APPORT DE PAILLE SUR LE DEFICIT DE SATURATION					Modèle A
-----	CEC(pH:7) - SBE(pH:7)					-----
	Durées: 1er jour 15ème jour 30ème jour 90ème jour 180ème jour					180ème jour
Fumures	Accroissement de CEC-SBE dans l'horizon A (cmol(+) kg-1)					
F2-F1	-2,52	-1,03	-1,04	0,08	-0,61	-0,93
F3-F1	-2,86	-2,96	-0,33	-0,60	0,35	-2,39
F4-F1	-4,54	-3,22	-2,25	-1,15	-1,91	-1,72
	Moyennes					
	Accroissement de CEC-SBE dans l'horizon B (cmol(+) kg-1)					
F4-F1	-0,11	-2,30	-0,54	2,02	1,39	
	Accroissement de CEC-SBE dans les modèles (mmol(+) / modèle)					
F4-F1	-11,50	-11,49	-6,43	0,16	-2,68	-4,30

FIGURE 29

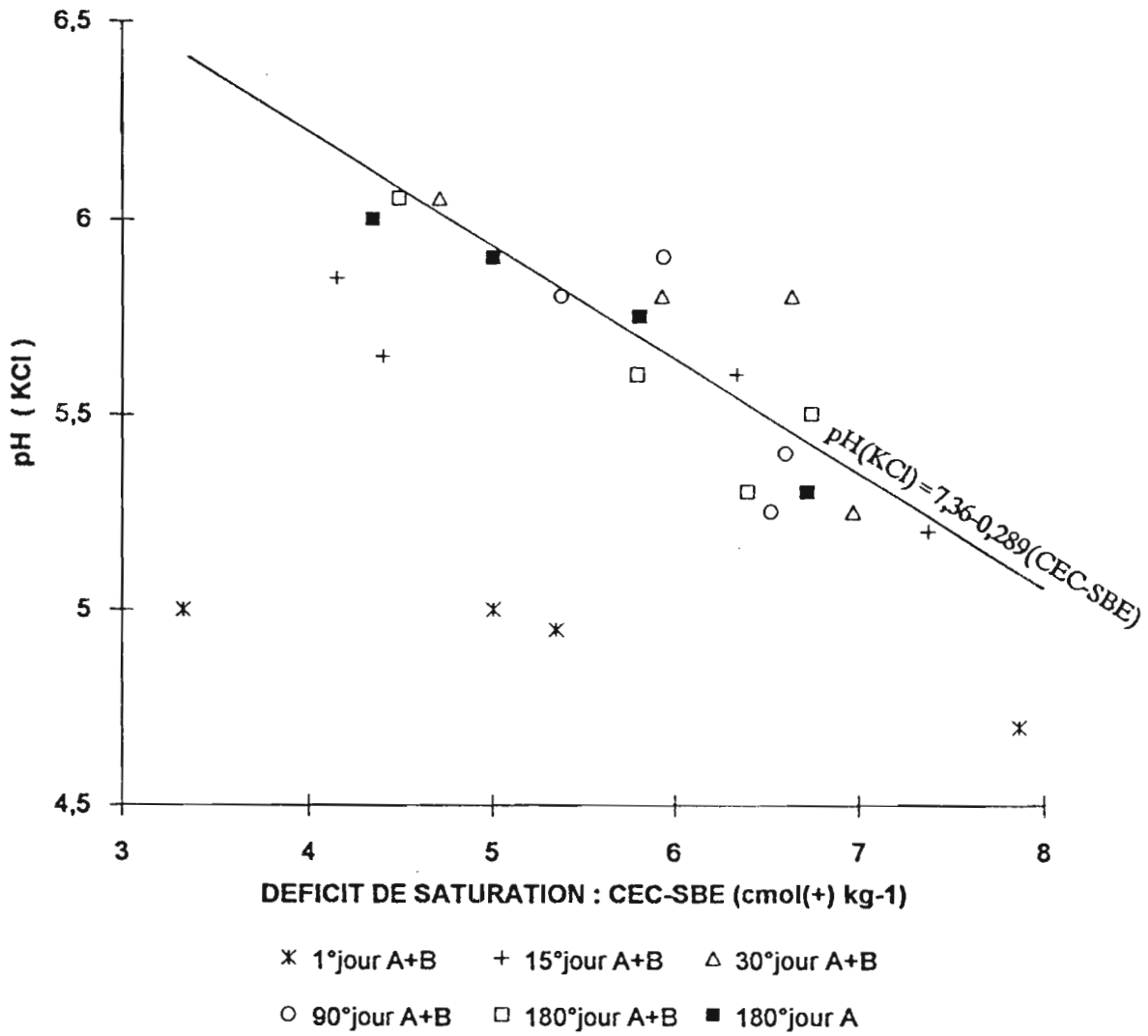
RELATION ENTRE LE pH (H₂O) ET LE DEFICIT DE SATURATION
dans l' horizon A des modèles



- * 1°jour A+B + 15°jour A+B Δ 30°jour A+B
○ 90°jour A+B □ 180°jour A+B ■ 180°jour A

FIGURE 30

RELATION ENTRE LE pH (KCl) ET LE DEFICIT DE SATURATION
dans l' horizon A des modèles



Pour l'ensemble des modèles (A+B), l'apport de paille provoque donc une diminution de (DS_4-DS_1) , qui est surtout marquée pendant les quinze premiers jours. Cette diminution du déficit de saturation s'atténue ensuite; et au troisième mois, (DS_4-DS_1) devient pratiquement nul. Le déficit de saturation pour l'ensemble des modèles (F_4) décroît nettement plus que pour les modèles (F_1) pendant les derniers mois.

En résumé, l'apport de paille fait donc décroître le déficit de saturation de l'ensemble des modèles (A+B) en début d'expérience. Mais inversement, il fait croître (DS) dans l'horizon B à partir du troisième mois. Ceci paraît indiquer que les solutions qui percolent cet horizon ont alors tendance à le désaturer.

Il convient donc d'examiner les relations qui existent entre le déficit de saturation, c'est à dire la somme des cations acides fixés sur le complexe adsorbant, et l'évolution de la réaction des deux horizons des modèles.

RELATIONS ENTRE LE pH ET LE DEFICIT DE SATURATION

Horizon A

Les graphiques ci-joint (fig.29 et 30) montrent que, en début d'incubation (1er et 15ème jour), l'apport de paille provoque une forte diminution du déficit de saturation ($DS = CEC-SBE$), et un faible accroissement du pH (H_2O ou KCl) dans l'horizon A. Par contre à partir du 30ème jour, ces deux paramètres varient à peu près également, mais en sens inverse. Les points des graphiques se regroupent donc autour de droites de pentes négatives:

$$pH (H_2O) = 7,35 - 0,204 \times DS \quad R^2=0,711^{***} \text{ pour } 30 < t < 180 \text{ jours}$$

$$pH (KCl) = 7,36 - 0,289 \times DS \quad R^2=0,713^{***} \text{ pour } 30 < t < 180 \text{ jours}$$

Ces droites de régression montrent que, lorsque toutes les charges permanentes et variables sont saturées par des cations basiques,

le $pH (H_2O) = pH (KCl) = 7,35$, c'est à dire une valeur du pH à peine supérieure au pH théorique correspondant à une concentration nulle en protons. Cette petite différence doit pouvoir s'expliquer par les teneurs en cations basiques, dont nous n'avons pas tenu compte dans les calculs, comme NH_4^+ échangeable.

Pour les mesures de pH faites dans KCl, 1M, la pente de la droite de régression est nettement plus forte, ce qui indique que l'acidité d'échange représenterait environ un tiers des cations acides présents dans l'horizon A des modèles.

En résumé, pendant les quinze premiers jours, l'augmentation des doses de paille enfouie dans l'horizon A provoque surtout une diminution des cations acides dans cet horizon, en particulier de l'hydrogène lié aux matières organiques par des liaisons covalentes. À partir du premier mois, l'apport de paille provoque aussi une nette diminution des protons fixés sur le complexe adsorbant de cet horizon A.

Horizon B

Nous avons vu que l'apport de paille dans l'horizon A provoque dans l'horizon B, une forte baisse de DS, c'est à dire des cations acides fixés sur le complexe adsorbant, pendant le premier mois d'incubation, alors que le pH et donc la concentration en protons varie assez peu. Par

contre au cours des mois suivants, le pH baisse fortement et le déficit de saturation s'accroît nettement.

Les solutions qui percolent à travers cet horizon B au cours du premier mois, font donc décroître les teneurs en ions alumineux (ou ferrique) hydroxylés, mais modifie peu les teneurs en protons fixés sur le complexe adsorbant. Au cours des mois suivants, c'est l'inverse qui se produit et les teneurs en protons fixés sur le complexe adsorbant de l'horizon B s'accroissent nettement. Ces déductions sont confirmées par les flux importants de fer et d'aluminium recueillis dans les percolats vers le trentième jour, et par l'acidification des percolats au cours des derniers mois d'incubation.

En résumé, l'effet de l'apport de paille sur la dynamique des cations acides n'est donc pas exactement inverse de celle des cations basiques. Par exemple en début d'incubation, il y a à la fois dans l'horizon A et B, un fort accroissement des cations basiques et une faible diminution de l'acidité d'échange des sols. Par contre, au cours de la deuxième partie de l'expérience, la lixiviation des modèles enrichis en paille provoque une forte acidification de la garniture cationique de l'horizon B, mais une faible diminution des cations basiques, ou du taux de saturation (SBE/CEC) de cet horizon.

2.7. CONCLUSIONS SUR LE COMPLEXE D' ECHANGE CATIONIQUE DES MODELES

=====

Dès le premier jour, la capacité d'échange cationique à pH:7 du mélange sol-paille est inférieure à la somme des capacités d'échange des deux constituants. Cette baisse de la CEC peut s'expliquer par les pertes d'acides organiques provenant de la paille de luzerne qui sont lixiviés au cours du ressuyage des modèles. Par la suite, la CEC de l'horizon A des modèles est grossièrement proportionnelle à sa teneur en carbone total, mais les coefficients de détermination des régressions linéaires deviennent de plus en plus médiocres dans le temps.

Par contre pour chaque durée d'incubation, il existe une corrélation étroite entre la CEC de l'horizon A des modèles et la teneur en carbone restant qui provient de la paille ajoutée dans cet horizon. La capacité d'échange des débris végétaux résiduels et des matières humiques qui proviennent de la transformation de la paille de luzerne ont une capacité d'échange qui passe en six mois de 100 à 230 cmol(+) kg⁻¹ de carbone. Mais par suite de la décomposition rapide de ces matières organiques la CEC qui provient de la paille décroît de moitié en 300 jours.

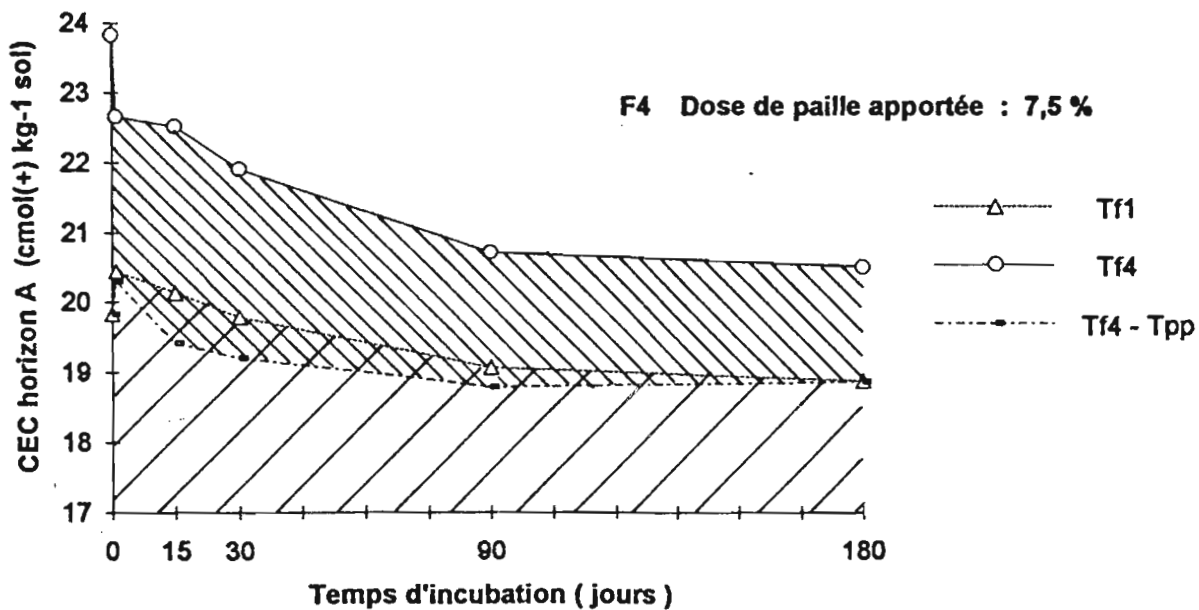
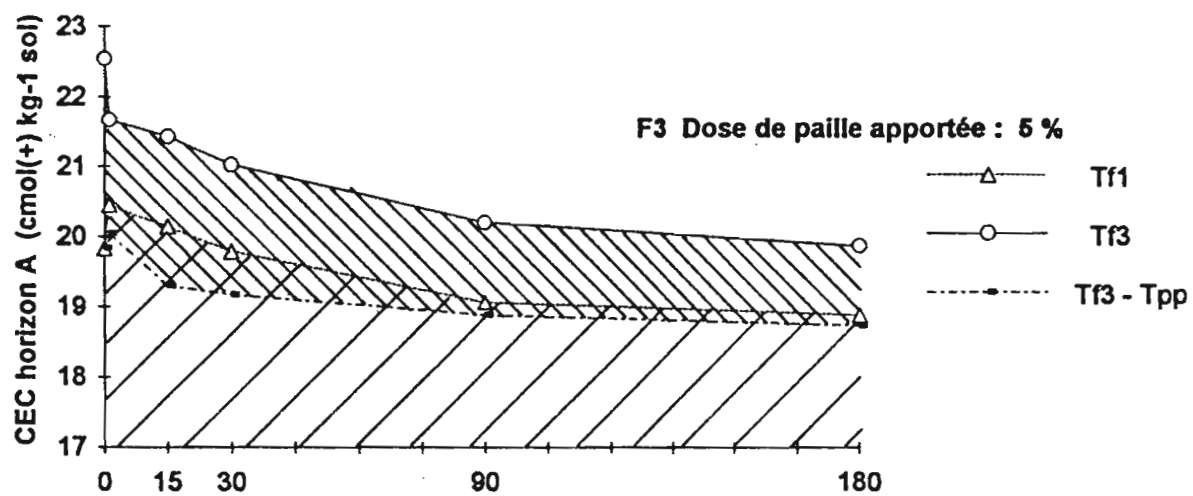
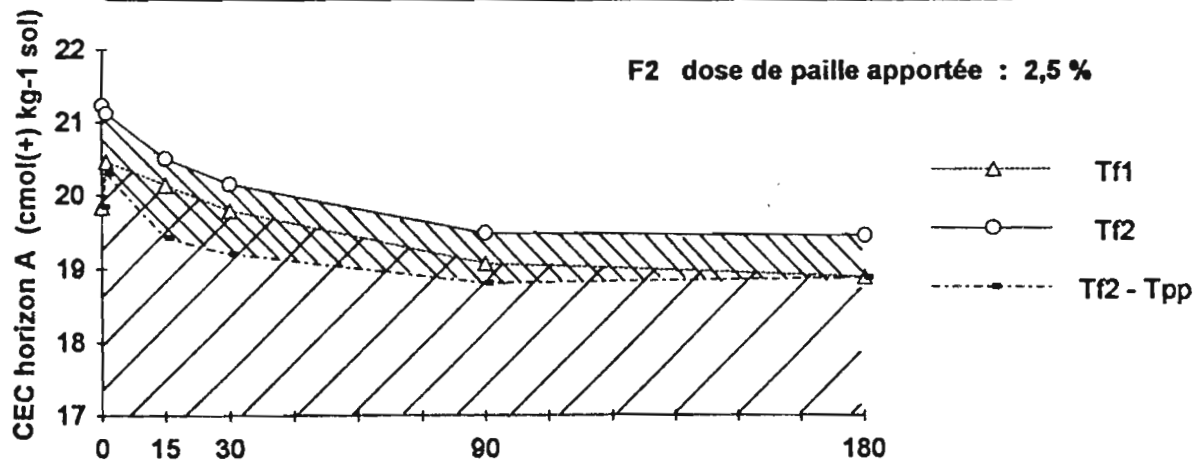
L'additivité des CEC provenant de la paille et provenant du sol n'est observée qu'en fin d'expérience (fig.31); par contre au cours des trois premiers mois, il existe une interaction qui est du même ordre de grandeur pour les trois doses de paille apportées. Il est logique de penser que l'effet d'incitation que nous avons observé, en accélérant la minéralisation des matières organiques du sol dans les modèles enrichis en paille, provoque une décroissance de la CEC provenant du sol, plus rapide dans les modèles (F₂), (F₃) et (F₄) que dans les modèles témoins (F₁) sans paille.

La mesure de la capacité d'échange des fractions granulométriques obtenues par tamisage humide, nous a montré que la CEC du sol de l'horizon A restait égale à la somme des CEC des différentes fractions agrégées stables à l'eau. Cette méthode de fractionnement assez douce (sans ultra-sons) ne paraît pas démasquer de sites d'échange; mais par suite d'empêchements stériques, il ne paraît pas y avoir une relation étroite entre l'accroissement de la teneur en carbone de la fraction macro-agrégée (0,2 à 2mm) et l'augmentation de sa CEC.

La diminution progressive dans le temps de la CEC de l' horizon B des modèles enrichis en paille paraît être due principalement à une diminution des charges permanentes des minéraux argileux 2:1, suite à l'illuviation et à la fixation de potassium et d'ammonium dans cet horizon.

En effet, les cations basiques provenant de la minéralisation de la paille de luzerne ajoutée modifient transitoirement la garniture cationique du complexe d'échange des deux horizons des modèles, mais le devenir des divers cations est très différent. Tandis que 90% du potassium provenant de la paille reste dans les modèles, pour les deux tiers à l'état non-échangeable ou fixé; inversement les pertes de magnésium par lixiviation représentent 150 à plus de 200% du magnésium apporté par la paille, et une partie du magnésium éluvié provient de magnésium non-échangeable du sol.

Capacité d'échange cationique provenant de la paille et du sol



CEC provenant de la paille

CEC provenant du sol

L'enrichissement en résidus végétaux de l'horizon A des modèles entraîne une nette augmentation du pH et de la saturation de cet horizon par des cations basiques. Inversement les matières organiques lixiviées provoquent assez rapidement une baisse du pH de l'horizon B et un accroissement de son déficit de saturation, c'est à dire remplace sur le complexe adsorbant une partie des cations basiques par des cations acides .

Le phénomène le plus spectaculaire qui paraît lié à l' enfouissement de paille de luzerne dans ce sol brun sur limons, est sans conteste la mobilisation de fer dans l'horizon A des modèles et l' illuviation de la plus grande partie du fer lixivié sous forme de ferrihydrite dans l'horizon B.

ANNEXES

```
+++++  
+  
+ RESULTATS ANALYTIQUES +  
+  
+++++
```


Modèle A+B	CARBONE DANS LE MODELE					en (10-3)	Modèle A
*****	-----					*****	*****
Durées :	1er jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	:	180ème J.
	CARBONE dans l' horizon A						
Fumures	*****					*****	Répétitions :
1 (0 %)	26,60	25,64	25,30	22,92	22,46	:	23,00 *
2 (2,5%)	34,88	31,40	31,70	26,62	24,48	:	25,14 * 1
3 (5 %)	44,84	37,78	35,62	29,60	28,72	:	27,48 *
4 (7,5%)	49,74	48,36	41,34	34,22	29,26	:	29,82 *

1	26,80	25,90	24,16	24,24	22,22	:	21,56 *
2	34,54	32,58	30,36	26,46	24,88	:	25,16 * 2
3	44,50	39,28	37,12	28,52	26,74	:	27,62 *
4	49,56	47,14	43,38	33,50	29,26	:	29,76 *
=====							
1	26,70	25,77	24,73	23,58	22,34	:	22,28 *
2	34,71	31,99	31,03	26,54	24,68	:	25,15 * Moyennes
3	44,67	38,53	36,37	29,06	27,73	:	27,55 *
4	49,65	47,75	42,36	33,86	29,26	:	29,79 *

Modèle A+B	CARBONE dans l' horizon B						Modèle A
Fumures dans l'Horizon A	*****					*****	Répétitions :
1	4,05	4,17	3,96	3,83	3,78	:	*
2	4,21	4,79	4,16	3,79	4,03	:	Sans * 1
3	4,40	5,21	5,12	4,18	4,28	:	Horizon B *
4	3,97	5,11	5,36	4,39	4,51	:	*

1	4,01	4,18	4,02	3,81	3,75	:	*
2	4,40	4,66	4,12	3,88	3,95	:	Sans * 2
3	4,46	5,34	4,90	4,21	4,29	:	Horizon B *
4	4,01	5,38	5,33	4,34	4,46	:	*
=====							
1	4,03	4,18	3,99	3,82	3,77	:	*
2	4,31	4,73	4,14	3,84	3,99	:	Sans * Moyennes
3	4,43	5,28	5,01	4,20	4,29	:	Horizon B *
4	3,99	5,25	5,35	4,37	4,49	:	*

Modèle A+B	AZOTE dans l'horizon A					en (10-3)	* * *	Modèle A
							* * *	
	Temps: 1er Jour	15ème j.	30ème j.	90ème j.	180ème j.	* * *	180me j.	
Fumures	-----					Répétition	-----	
1 (0 %)	2,18	2,20	2,06	1,94	1,82	* * *	1,79	
2 (2,5 %)	2,78	2,66	2,66	2,37	2,14	* 1 *	2,09	
3 (5 %)	3,31	3,30	3,21	3,02	2,55	* * *	2,41	
4 (7,5 %)	3,79	3,85	3,73	3,27	2,75	* * *	2,70	

1	2,13	2,07	2,03	1,85	1,89	* * *	1,77	
2	2,52	2,70	2,65	2,35	2,21	* 2 *	2,18	
3	3,32	3,43	3,21	2,88	2,38	* * *	2,46	
4	3,84	3,99	3,76	3,04	2,61	* * *	2,83	

1	2,16	2,14	2,05	1,90	1,86	* * *	1,78	
2	2,65	2,68	2,66	2,36	2,18	Moyennes	2,14	
3	3,32	3,37	3,21	2,95	2,47	* * *	2,44	
4	3,82	3,92	3,75	3,16	2,68	* * *	2,77	

	AZOTE dans l'horizon B					* * *		
						* * *		
	Temps: 1er Jour	15ème j.	30ème j.	90ème j.	180ème j.	* * *		
Fumures	-----					Répétitions	-----	
1	0,46	0,49	0,48	0,50	0,46	* * *		
2	0,46	0,54	0,55	0,59	0,55	* 1 *		
3	0,42	0,54	0,69	0,78	0,67	* * *		
4	0,45	0,50	0,70	0,94	0,64	* * *		

1	0,42	0,46	0,49	0,48	0,44	* * *		
2	0,44	0,48	0,53	0,56	0,50	* 2 *		
3	0,46	0,53	0,62	0,78	0,59	* * *		
4	0,45	0,55	0,72	0,79	0,66	* * *		

1	0,44	0,48	0,49	0,49	0,45	* * *		
2	0,45	0,51	0,54	0,58	0,53	Moyennes		
3	0,44	0,54	0,66	0,78	0,63	* * *		
4	0,45	0,53	0,71	0,86	0,65	* * *		

Modèle A+B AMMONIUM FIXE (Non-échangeable) dans l' Horizon A du modèle

FUMURES Durées: 1er Jour 15ème Jour 30ème J, 90ème J, 180ème J, Répétitions

F1 (0%)	:	1,03	1,11	1,34	0,95	0,99	: 1ère
F4 (7,5%)	:	1,11	1,38	1,57	1,30	1,17	:

F1	:	0,70	1,16	1,29	0,88	0,84	: 2ème
F4	:	0,92	1,35	1,53	1,10	1,01	:

F1	:	0,87	1,14	1,32	0,92	0,92	: Moyennes
F4	:	1,02	1,37	1,55	1,20	1,09	:

Teneur initiale : 0,76 cmol(NH4+),Kg-1 ou me/100g Déviation standard : 0,07

Modèle A+B AMMONIUM FIXE (Non-échangeable) dans l' Horizon B du modèle

FUMURES Durées: 1er Jour 15ème Jour 30ème J, 90ème J, 180ème J, Répétitions

F1 (0%)	:	0,81	0,86	0,89	0,89	0,85	: 1ère
F4 (7,5%)	:	0,75	1,02	1,73	2,58	1,46	:

F1	:	0,80	0,86	1,20	1,04	0,86	: 2ème
F4	:	0,78	1,21	2,24	2,17	1,51	:

F1	:	0,81	0,86	1,05	0,97	0,86	: Moyennes
F4	:	0,77	1,12	1,99	2,38	1,49	:

Teneur initiale : 0,85 cmol(NH4+),Kg-1 ou me/100g

MODELE A+B		CARBONE (mg par g sol) dans Fractions Granulométriques							Horizon A
-----		*****							
Durées	Fumures	MOL	SG	MOL + SG	SF	AL	W	Totaux	
1er Jour	F1	1,71	9,64	11,34	7,07	5,94	2,61	26,97	
	F2	6,19	9,75	15,94	8,01	7,40	3,47	34,82	
	F3	8,51	13,63	22,14	8,31	7,94	6,00	44,39	
	F4	8,20	20,24	28,44	9,73	8,55	4,18	50,90	
15ème J.	F1	2,32	4,85	7,17	8,86	8,38	1,54	25,94	
	F2	4,54	5,69	10,23	9,17	9,01	1,89	30,30	
	F3	8,65	10,93	19,57	7,46	8,34	1,62	36,99	
	F4	13,33	13,18	26,52	7,33	8,19	3,17	45,22	
30ème J.	F1	1,71	7,76	9,47	7,79	6,62	1,81	25,69	
	F2	3,19	8,13	11,32	7,72	9,15	2,25	30,45	
	F3	6,60	12,10	18,70	7,93	7,37	1,74	35,74	
	F4	11,06	15,35	26,41	6,93	7,09	1,82	42,24	
90ème J.	F1	1,32	3,89	5,21	8,53	8,22	1,47	23,43	
	F2	2,27	5,11	7,37	7,78	9,09	1,58	25,82	
	F3	1,93	9,10	11,03	8,70	8,95	1,45	30,13	
	F4	3,04	14,02	17,06	7,96	8,03	1,46	34,51	
180ème J.	F1	0,92	4,03	4,95	8,50	8,05	0,79	22,29	
	F2	0,62	4,87	5,50	8,99	9,13	1,18	24,80	
	F3	2,36	6,25	8,60	9,31	10,02	1,18	29,11	
	F4	1,12	7,32	8,44	10,19	9,22	0,90	28,75	

MODELE A	F1	0,98	3,28	4,27	9,32	7,68	1,26	22,52	
-----	F2	1,08	4,11	5,19	9,30	9,74	1,00	25,23	
180ème J.	F3	1,35	5,97	7,32	9,83	10,11	1,08	28,34	
	F4	3,33	7,16	10,49	9,95	9,68	1,03	31,15	

MODELE A+B		AZOTE (pour mille) dans Fractions Granulometriques							Total
-----		*****							Horizon A
Durees	Fumures	MOL	SG	MOL + SG	SF	AL	W	:	
1er Jour	F1	0,068	0,697	0,765	0,602	0,658	0,418	:	2,443
	F2	0,299	0,622	0,921	0,702	0,768	0,327	:	2,718
	F2	0,393	0,842	1,235	0,680	0,844	0,622	:	3,381
	F4	0,397	1,195	1,592	0,717	0,906	0,501	:	3,716
15eme J.	F1	0,108	0,258	0,366	0,771	0,887	0,208	:	2,232
	F2	0,204	0,353	0,557	0,795	1,003	0,279	:	2,634
	F3	0,513	0,790	1,303	0,719	0,942	0,283	:	3,247
	F4	0,654	0,999	1,653	0,632	0,946	0,252	:	3,483
30eme J.	F1	0,061	0,561	0,622	0,689	0,702	0,258	:	2,271
	F2	0,130	0,564	0,694	0,677	1,054	0,330	:	2,755
	F3	0,261	1,014	1,275	0,740	0,908	0,240	:	3,163
	F4	0,609	1,283	1,892	0,660	0,840	0,242	:	3,634
90eme J.	F1	0,064	0,231	0,295	0,730	0,897	0,195	:	2,117
	F2	0,092	0,318	0,410	0,771	1,021	0,260	:	2,462
	F3	0,092	0,680	0,772	0,770	1,079	0,294	:	2,915
	F4	0,123	1,060	1,183	0,707	0,945	0,306	:	3,141
180eme J.	F1	0,039	0,235	0,274	0,739	0,820	0,079	:	1,912
	F2	0,028	0,350	0,378	0,776	0,985	0,210	:	2,349
	F3	0,085	0,417	0,502	0,883	1,062	0,192	:	2,639
	F4	0,046	0,486	0,532	0,962	1,019	0,133	:	2,646

MODELE A	F1	0,045	0,187	0,232	0,857	0,775	0,181	:	2,045
180eme J.	F2	0,065	0,208	0,273	0,822	1,068	0,180	:	2,343
	F3	0,066	0,367	0,433	0,928	1,095	0,188	:	2,644
	F4	0,140	0,545	0,685	0,929	1,036	0,175	:	2,825

MODELE A+B		Rapport C/N dans Fractions Granulometriques					Horizon A	
-----		*****						
Durees	Fumures	MDL + SG	SF	AL	W	:	Total	
1er Jour	F1	14,83	11,75	9,03	6,25	:	11,04	
	F2	17,31	11,41	9,63	10,60	:	12,81	
	F3	17,93	12,22	9,41	9,64	:	13,13	
	F4	17,86	13,57	9,44	8,35	:	13,70	
15eme J.	F1	19,58	11,49	9,44	7,39	:	11,62	
	F2	18,37	11,53	8,99	6,78	:	11,50	
	F3	15,02	10,38	8,85	5,71	:	11,39	
	F4	16,04	11,60	8,66	12,59	:	12,98	
30eme J.	F1	15,22	11,31	9,43	7,02	:	11,31	
	F2	16,31	11,40	8,69	6,83	:	11,05	
	F3	14,67	10,72	8,12	7,26	:	11,30	
	F4	13,96	10,49	8,44	7,54	:	11,62	
90eme J.	F1	17,67	11,68	9,16	7,53	:	11,07	
	F2	17,98	10,09	8,90	6,06	:	10,49	
	F3	14,29	11,29	8,29	4,93	:	10,33	
	F4	14,42	11,26	8,49	4,76	:	10,99	
180eme J.	F1	18,07	11,51	9,82	9,96	:	11,66	
	F2	14,54	11,59	9,27	5,62	:	10,56	
	F3	17,14	10,54	9,44	6,15	:	11,03	
	F4	15,86	10,59	9,05	6,75	:	10,86	

MODELE A	F1	18,39	10,88	9,90	6,96	:	11,01	
-----	F2	19,01	11,31	9,12	5,56	:	10,77	
180eme J.	F3	16,90	10,99	9,23	5,72	:	10,72	
	F4	15,31	10,71	9,34	5,89	:	11,03	

Modèle A+B		MATIERES ORGANIQUES dans l'horizon A					

Durées:	0	1er	15eme	30eme	90eme	180eme	
=====							
C- MOL Carbone des Matières Organiques Légères							
Fumures: -----							
F1 (0%)	0,79	1,01	0,54	0,89	0,85	0,58	
F2 (2,5%)	(2,63)	2,17	1,23	0,98	0,51	0,70	
F3 (5 %)	(4,37)	4,65	2,83	2,00	1,44	0,87	
F4 (7,5%)	(6,04)	6,48	3,13	3,84	1,67	1,25	
=====							
C- AFL Carbone des Acides Fulviques Libres							
Fumures: -----							
F1	1,90	2,75	2,10	1,91	1,58	1,61	
F2	(3,97)	4,28	2,71	2,01	1,66	1,73	
F3	(5,95)	5,89	3,09	2,31	1,76	1,74	
F4	(7,82)	7,58	3,02	2,39	2,25	1,84	
=====							
C- AHP Carbone des Acides Humiques (Pyrophosphate Na)							
Fumures: -----							
F1	1,11	1,52	1,42	2,06	1,51	1,11	
F2	(1,98)	1,88	1,51	1,80	1,85	1,22	
F3	(2,80)	1,99	1,75	1,70	2,38	1,53	
F4	(3,58)	2,16	2,41	2,50	2,80	1,68	
=====							
C- AFP Carbone des Acides Fulviques (Pyrophosphate Na)							
Fumures: -----							
F1	2,08	2,64	2,50	1,20	1,39	3,15	
F2	(2,23)	3,07	3,29	1,54	1,26	2,48	
F3	(2,37)	3,29	2,99	2,27	1,29	2,58	
F4	(2,51)	3,45	2,89	1,66	1,23	3,10	
=====							
C- AHS Carbone des Acides Humiques (Soude)							
Fumures: -----							
F1	0,70	0,74	1,05	1,13	1,10	0,79	
F2	(1,28)	1,03	1,42	1,32	2,00	0,71	
F3	(1,84)	1,06	1,93	1,76	2,26	0,85	
F4	(2,37)	1,35	2,09	1,87	2,80	0,96	
=====							
C- AFS Carbone des Acides Fulviques (Soude)							
Fumures: -----							
F1	3,63	3,75	3,30	2,25	2,06	2,76	
F2	(3,77)	3,94	3,61	2,42	1,17	3,04	
F3	(3,91)	3,88	3,52	2,99	1,41	3,06	
F4	(4,03)	4,30	3,77	2,74	1,90	2,99	
=====							
C- HUM Carbone de l' Humine							
Fumures: -----							
F1	15,46	14,41	15,60	15,17	14,91	11,69	
F2	(19,93)	18,31	17,57	19,68	17,36	13,51	
F3	(24,18)	23,03	20,96	23,44	18,26	15,58	
F4	(28,23)	24,27	30,63	27,30	22,35	17,08	
=====							

Modèle A+B		MATIERES ORGANIQUES dans l' Horizon B					
(C pour mille)		*****					
Durées:	0	1er	15ème	30ème	90ème	180ème	
C- TOT Teneurs en Carbone Organique							
Fumures: -----							
F1 (0 %)	3,76	3,90	4,18	4,10	3,90	3,90	
F2 (2,5%)	(3,76)	4,40	4,66	4,60	3,90	4,00	
F3 (5 %)	(3,76)	4,40	5,34	5,00	4,30	4,00	
F4 (7,5%)	(3,76)	3,98	5,38	5,60	4,40	4,40	
C- AFL Carbone des Acides Fulviques Libres							
Fumures: -----							
F1	0,33	0,38	0,44	0,37	0,41	0,43	
F2	(0,33)	0,90	0,57	0,56	0,47	0,44	
F3	(0,33)	1,06	0,76	0,68	0,67	0,54	
F4	(0,33)	0,88	0,79	0,72	0,68	0,63	
C- AHP Carbone des Acides Humiques (Pyrophosphate Na)							
Fumures: -----							
F1	0,15	0,08	0,11	0,13	0,13	0,10	
F2	(0,15)	0,11	0,13	0,13	0,13	0,10	
F3	(0,15)	0,10	0,10	0,17	0,17	0,11	
F4	(0,15)	0,12	0,16	0,19	0,18	0,12	
C- AFP Carbone des Acides Fulviques (Pyrophosphate Na)							
Fumures: -----							
F1	0,23	0,23	0,30	0,25	0,21	0,27	
F2	(0,23)	0,26	0,29	0,26	0,23	0,30	
F3	(0,23)	0,28	0,35	0,28	0,33	0,29	
F4	(0,23)	0,27	0,35	0,34	0,33	0,30	
C- AHS Carbone des Acides Humiques (Soude)							
Fumures: -----							
F1	0,03	0,06	0,07	0,09	0,07	0,11	
F2	(0,03)	0,06	0,06	0,09	0,08	0,09	
F3	(0,03)	0,05	0,07	0,06	0,07	0,11	
F4	(0,03)	0,06	0,10	0,13	0,14	0,12	
C- AFS Carbone des Acides Fulviques (Soude)							
Fumures: -----							
F1	0,33	0,24	0,26	0,21	0,22	0,26	
F2	(0,33)	0,24	0,24	0,25	0,21	0,26	
F3	(0,33)	0,31	0,28	0,29	0,32	0,26	
F4	(0,33)	0,29	0,30	0,13	0,24	0,27	
C-HUM Carbone de l' Humine							
Fumures: -----							
F1	2,63	2,89	2,78	3,00	2,86	2,72	
F2	(2,63)	2,81	3,16	3,32	2,74	2,79	
F3	(2,63)	2,56	3,78	3,49	2,71	2,55	
F4	(2,63)	1,86	3,68	4,04	2,79	2,92	

Modele A+B	POLYSACCHARIDES					Modele A
----- Carbone équivalent Glucose (mg C / g sol) -----						
Durées;	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	180ème J.
----- Horizon A -----						
Fumures						
F1	3,76	3,52	3,21	3,00	2,77	2,77
F2	5,71	4,91	3,90	3,51	3,09	3,16
F3	8,26	7,25	4,83	3,91	3,20	3,64
F4	9,52	9,89	5,99	5,01	3,34	3,52
----- Horizon B -----						
Fumures						
F1	0,35	0,34	0,26	0,26	0,35	
F2	0,41	0,41	0,28	0,26	0,31	
F3	0,47	0,45	0,31	0,31	0,20	
F4	0,44	0,45	0,34	0,29	0,38	

FLUX DE CARBONE DANS LES PERCOLATS

MODELE A + B *****						
Flux	Ressuyage	1-15 j.	15-30 j.	30-60 j.	60-90 j.	90-180 j.
Hebdom. F1	0,310	3,640	1,355	2,458	1,156	0,854
moyen F2	2,020	8,330	18,425	13,748	1,386	1,100
F3	8,540	9,388	161,688	33,880	3,135	2,185
F4	4,310	3,593	198,530	78,688	8,420	1,661

FLUX (mgC)	1er Jour	15ème j.	30ème j.	60ème j.	90ème j.	180ème j.
moyen F1	0,310	7,590	10,300	20,130	24,755	35,000
cumule F2	2,020	18,680	55,530	110,520	116,065	129,265
F3	8,540	27,315	350,690	486,210	498,750	524,965
F4	4,310	11,495	404,250	719,000	752,680	772,615
MODELE A *****						
Flux	Ressuyage	1-15 j.	15-30 j.	30-90 j.	90-180 j.	
Hebdom. F1	16,790	4,150	0,993	1,602	0,545	
moyen F2	73,150	12,563	7,823	8,045	0,822	
F3	103,440	43,595	20,193	6,951	1,355	
F4	154,900	72,735	62,900	49,196	1,508	

FLUX (mgC)	1er Jour	15ème j.	30ème j.	90ème j.	180ème j.	
moyen F1	16,790	25,090	27,075	39,890	46,435	
cumule F2	73,150	98,275	113,920	178,280	188,140	
F3	103,440	190,630	231,015	286,620	302,875	
F4	154,900	300,370	426,170	819,740	837,830	

Modèles A+B FLUX D' AZOTE DANS LES PERCOLATS							
***** (mg N / colonne du modèle)*****							
Flux	Ressuyage	1-15e J.	15-30e J.	30-60e J.	60-90e J.	90-180 J.	
Hebdom.	F1	0,025	0,374	0,047	0,261	0,520	1,082
moyen	F2	0,317	0,360	0,606	1,083	2,519	2,109
	F3	0,475	0,419	1,122	1,467	1,436	3,895
	F4	0,328	0,372	0,959	2,567	3,161	5,095

Flux		1er Jour	15ème J.	30ème J.	60ème j.	90ème J.	180ème J.
moyen	F1	0,025	0,773	0,867	1,909	3,989	18,059
cumulé	F2	0,317	1,036	2,248	6,579	16,653	44,073
	F3	0,475	1,312	3,555	9,423	15,165	61,521
	F4	0,328	1,071	2,988	13,257	25,900	87,072

Modèles A							
Flux	Ressuyage	1-15e J.	15-30e J.	30-90e J.	90-180 J.		
Hebdom.	F1	1,247	0,293	0,192	0,566	0,352	
moyen	F2	3,713	0,721	0,545	0,944	1,353	
	F3	5,737	1,991	1,384	1,910	2,246	
	F4	7,703	2,786	2,871	2,712	2,071	

Flux		1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	
moyen	F1	1,247	1,832	2,215	7,308	11,889	
cumulé	F2	3,713	5,155	6,244	14,736	32,328	
	F3	5,737	9,718	12,485	29,673	58,867	
	F4	7,703	13,274	19,016	43,420	70,339	

STOCKS DE CARBONE ET D'AZOTE DANS LES MODELES												
Fumures: ---- F1 (0 %) ----			---- F2 (2,5 %) --			---- F3 (5 %) ----			---- F4 (7,5 %) ----			
Horizons:	A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	A+B
=====												
MODELE A+B	Stocks de CARBONE dans les modèles (g C / colonne)											
Durées: =====												
0 (Co)	(6,73)	(0,57)	(7,30)	(9,23)	(0,57)	(9,80)	(11,73)	(0,57)	(12,30)	(14,23)	(0,57)	(14,80)
1	6,68	0,60	7,28	8,86	0,65	9,51	11,73	0,66	12,39	13,22	0,60	13,82
15	6,44	0,63	7,07	8,13	0,71	8,84	9,98	0,79	10,77	12,70	0,79	13,49
30	6,18	0,60	6,78	7,89	0,62	8,51	9,39	0,75	10,14	11,13	0,80	11,93
90	5,90	0,57	6,47	6,69	0,58	7,27	7,38	0,63	8,01	8,72	0,66	9,38
180 jours	5,59	0,57	6,16	6,21	0,60	6,81	7,04	0,64	7,68	7,46	0,67	8,13
=====												
MODELE A												
180 jours	5,59	-		5,61	-		6,99	-		7,61	-	

MODELE A+B	Stocks d' AZOTE dans les modèles (g N / colonne)											
Durées: =====												
0 (No)	(0,545)	(0,074)	(0,619)	(0,738)	(0,074)	(0,812)	(0,931)	(0,074)	(1,005)	(1,124)	(0,074)	(1,198)
1	0,540	0,066	0,606	0,677	0,068	0,745	0,872	0,066	0,938	1,017	0,068	1,085
15	0,535	0,072	0,607	0,681	0,077	0,758	0,873	0,081	0,954	1,042	0,080	1,122
30	0,513	0,074	0,587	0,676	0,081	0,757	0,829	0,099	0,928	0,985	0,107	1,092
90	0,475	0,074	0,549	0,595	0,087	0,682	0,749	0,117	0,866	0,814	0,129	0,943
180 jours	0,465	0,068	0,533	0,549	0,080	0,629	0,627	0,095	0,722	0,684	0,098	0,782
=====												
MODELE A												
180 jours	0,445	-		0,539	-		0,619	-		0,708	-	

Modèles A+B Capacité d'échange cationique de l'horizon A (cmol(+) kg⁻¹) Modèles A

Durées: 1er Jour 15ème J. 30ème J. 90ème J. 180ème J. Répétitions 180ème J.							
FUMURES							
F1	20,38	20,62	20,24	19,49	19,58		19,11
F2	20,96	20,57	20,27	19,80	20,07	- 1 -	19,31
F3	21,71	21,42	21,18	20,51	20,21		19,59
F4	22,62	22,34	22,16	20,86	20,50		19,77

F1	20,51	19,65	19,33	18,65	18,17		18,40
F2	21,28	20,42	20,02	19,14	18,80	- 2 -	18,85
F3	21,62	21,43	20,88	19,89	19,50		19,79
F4	22,70	22,69	21,66	20,57	20,52		20,14
=====							
F1	20,45	20,14	19,79	19,07	18,88		18,76
F2	21,12	20,50	20,15	19,47	19,44	Moyennes	19,08
F3	21,67	21,43	21,03	20,20	19,86		19,69
F4	22,66	22,52	21,91	20,72	20,51		19,96

Modèles A+B C.E.C. (cmol(+) kg⁻¹) de l' Horizon B

Durées: 1er Jour 15ème J. 30ème J. 90ème J. 180ème J. Répétitions							
FUMURES							
F1	16,20	16,84	16,73	16,20	15,30	- 1 -	
F4	16,40	16,11	15,43	14,69	13,56		

F1	15,96	16,48	16,08	15,70	15,22	- 2 -	
F4	16,06	15,72	15,29	14,61	13,84		
=====							
F1	16,08	16,66	16,41	15,95	15,26	Moyennes	
F4	16,23	15,92	15,36	14,65	13,70		

C.E.C.= Capacité d'Echange Cationique (pH:7) exprimée en cmol(+) kg⁻¹ ou me/100g

Modèle A+B		Somme des BASES ECHANGEABLES (cmol(+) Kg-1) dans l' Hor. A * Modèle A						
-----		*****						
Durées:		1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	* 180ème J.	
FUMURES		-----					Répétitions*	-----
F1		12,62	12,85	12,94	12,74	12,72	* 11,96	
F2		15,93	14,07	14,23	12,78	14,01	- 1 - * 12,37	
F3		16,34	17,14	13,75	13,27	12,03	* 14,78	
F4		19,98	18,35	17,22	14,32	15,76	* 12,94	

F1		12,54	12,69	12,70	12,34	12,23	* 12,09	
F2		15,68	14,24	14,21	12,95	13,27	- 2 - * 14,18	
F3		16,98	16,90	15,04	15,26	14,18	* 15,91	
F4		18,68	18,38	17,17	16,35	16,27	* 16,95	
=====								
F1		12,58	12,77	12,82	12,54	12,48	* 12,03	
F2		15,81	14,16	14,22	12,87	13,64	Moyennes * 13,28	
F3		16,66	17,02	14,40	14,27	13,11	* 15,35	
F4		19,33	18,37	17,20	15,34	16,02	* 14,95	

Modèle A+B		Somme des BASES ECHANGEABLES (cmol(+) Kg-1) dans l' Hor. B *						
-----		*****						
FUMURES		-----					Répétitions*	-----
F1		14,43	14,22	15,12	14,06	14,09	* 14,09	
F2		15,05	15,10	13,97	12,88	12,64	- 1 - * 12,64	
F3		14,59	15,29	13,48	10,15	10,47	* 10,47	
F4		14,52	15,76	14,16	10,41	10,91	* 10,91	

F1		14,28	15,20	14,89	14,45	14,22	* 14,22	
F2		14,69	16,44	14,10	13,53	13,47	- 2 - * 13,47	
F3		14,88	16,86	13,42	11,72	12,17	* 12,17	
F4		14,46	16,41	14,18	10,96	11,42	* 11,42	
=====								
F1		14,36	14,71	15,01	14,26	14,16	* 14,16	
F2		14,87	15,77	14,04	13,21	13,06	Moyennes * 13,06	
F3		14,74	16,08	13,45	10,94	11,32	* 11,32	
F4		14,49	16,09	14,17	10,69	11,17	* 11,17	

Modèle A+B		Somme des BASES ECHANGEABLES dans les Modèles (Hor. A+B)					*	
-----		*****					-----	
FUMURES		moyennes exprimées en mmol(+) (ou me) par modèle					*	
F1		52,98	53,99	54,56	52,73	52,42	* 52,42	
F2		61,82	59,04	56,60	51,97	53,68	Moyennes * 53,68	
F3		63,75	66,66	56,16	52,07	49,74	* 49,74	
F4		70,06	70,05	64,24	54,37	56,79	* 56,79	

Modèle A+B		Somme des BASES (Ca, Mg, K, Na) recueillies dans les PERCOLATS					*	
-----		(Bases apportées)					-----	
F1 (0,00)		0,04	0,49	0,70	1,77	3,68	Moyennes * 3,68	
F2 (11,06)		0,13	1,11	2,65	6,40	9,96	exprimées * 9,96	
F3 (22,11)		0,20	1,43	12,49	16,88	22,47	en mmol(+) * 22,47	
F4 (33,17)		0,08	0,58	10,48	16,29	23,78	par modèle * 23,78	

Modele A+B MAGNESIUM echangeable ((me/100) dans Horizon A							* Modele A *
----- *****							*-----*
Durees: 1er Jour 15eme J. 30eme J. 90eme J. 180eme J.							* 180eme J.*
FUMURES						Repetitions*	*
F1	2,20	2,18	2,17	2,19	2,21	*	2,13 *
F2	2,46	2,11	2,12	1,97	2,10	- 1 - *	1,81 *
F3	2,69	2,30	1,76	1,62	1,62	*	1,94 *
F4	2,86	2,70	2,19	1,73	1,90	*	1,40 *
-----*							
F1	2,27	2,21	2,15	2,17	2,11	*	2,15 *
F2	2,40	2,15	2,18	2,07	2,02	- 2 - *	2,21 *
F3	2,65	2,35	2,02	2,06	2,03	*	2,21 *
F4	2,92	2,73	2,12	2,12	1,99	*	2,01 *
-----*							
F1	2,24	2,20	2,16	2,18	2,16	*	2,14 *
F2	2,43	2,13	2,15	2,02	2,06	Moyennes*	2,01 *
F3	2,67	2,33	1,89	1,84	1,83	*	2,08 *
F4	2,90	2,72	2,16	1,93	1,95	*	1,71 *

Modele A+B MAGNESIUM echangeable (me/100g) dans Horizon B							*
FUMURES						Repetitions*	*
F1	2,07	2,07	2,08	2,05	2,15	*	
F2	2,21	2,30	2,07	1,92	2,00	- 1 - *	
F3	2,03	2,44	2,05	1,58	1,61	*	
F4	2,04	2,29	1,99	1,40	1,62	*	
-----*							
F1	2,02	2,10	2,06	2,04	2,10	*	
F2	2,19	2,31	2,03	2,14	1,99	- 2 - *	
F3	2,23	2,50	1,98	1,68	1,89	*	
F4	1,98	2,34	2,07	1,52	1,76	*	
-----*							
F1	2,05	2,09	2,07	2,05	2,13	*	
F2	2,20	2,31	2,05	2,03	2,00	Moyennes*	
F3	2,13	2,47	2,02	1,63	1,75	*	
F4	2,01	2,32	2,03	1,46	1,69	*	

Modèle A+B	POTASSIUM échangeable (cmol(+) kg ⁻¹) dans l' Horizon A						*	Modèle A

	Durées; 1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.		180ème J.	
FUMURES	Répétitions*							
F1	0,38	0,43	0,42	0,43	0,43	*	0,46	
F2	1,13	1,41	1,34	1,21	0,90	- 1 - *	1,05	
F3	2,22	2,59	2,23	2,09	1,08	*	1,52	
F4	3,54	3,58	3,36	2,64	1,68	*	2,08	

F1	0,41	0,41	0,42	0,45	0,42	*	0,46	
F2	1,16	1,35	1,36	1,08	0,88	- 2 - *	1,11	
F3	2,34	2,45	2,38	2,18	0,94	*	1,68	
F4	3,72	3,78	3,49	2,41	1,69	*	2,67	
=====								
F1	0,40	0,42	0,42	0,44	0,43	*	0,46	
F2	1,15	1,38	1,35	1,15	0,89	Moyennes*	1,08	
F3	2,28	2,52	2,31	2,14	1,01	*	1,60	
F4	3,63	3,68	3,43	2,53	1,69	*	2,38	

Modèle A+B	POTASSIUM échangeable (cmol(+) kg ⁻¹) dans l' Horizon B						*	

FUMURES	Répétitions*							
F1	0,39	0,34	0,34	0,33	0,34	*		
F2	0,42	0,44	0,02	0,35	0,44	- 1 - *		
F3	0,41	0,45	0,55	0,80	0,79	*		
F4	0,41	0,53	0,71	1,45	1,12	*		

F1	0,40	0,32	0,33	0,33	0,34	*		
F2	0,42	0,36	0,20	0,28	0,31	- 2 - *		
F3	0,39	0,27	0,49	0,61	0,60	*		
F4	0,38	0,33	0,82	1,31	1,12	*		
=====								
F1	0,40	0,33	0,34	0,33	0,34	*		
F2	0,42	0,40	0,11	0,32	0,38	Moyennes*		
F3	0,40	0,36	0,52	0,71	0,70	*		
F4	0,40	0,43	0,77	1,38	1,12	*		

Modèle A+B	POTASSIUM ECHANGEABLE dans les Modèles (Hor. A+B)						*	Modèle A

FUMURES	moyennes exprimées en mmol(+) (ou me) par modèle						*	
F1	1,58	1,55	1,55	1,60	1,57	*	1,15	
F2	3,49	4,05	3,54	3,34	2,79	Moyennes*	2,70	
F3	6,30	6,84	6,54	6,40	3,57	*	4,00	
F4	9,67	9,85	9,71	8,38	5,89	*	5,95	

Modèle A+B	POTASSIUM recueilli dans les PERCOLATS (totaux cumulés)						*	Modèle A

(K paille)							*	
F1 (0,00)	0,001	0,007	0,010	0,048	0,094	Moyennes*	0,346	
F2 (4,08)	0,002	0,010	0,012	0,217	0,520	exprimées	1,475	
F3 (8,15)	0,004	0,012	0,016	0,151	1,077	en mmol(+)	2,003	
F4 (12,23)	0,004	0,009	0,017	0,212	1,488	par modèle	4,975	

Modèle A+B	SODIUM échangeable (me/100g) dans l'horizon A					* Répétitions	* Modèle A
-----	*****					*	
Durées	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.		* 180ème J.
FUMURES						Répétitions	*
F1	0,21	0,18	0,19	0,16	0,17	*	0,05
F2	0,24	0,19	0,19	0,16	0,04	- 1 - *	0,03
F3	0,27	0,22	0,17	0,15	0,03	*	0,03
F4	0,29	0,26	0,21	0,14	0,04	*	0,02

F1	0,20	0,18	0,18	0,13	0,13	*	0,08
F2	0,23	0,19	0,20	0,07	0,07	- 2 - *	0,08
F3	0,26	0,22	0,19	0,11	0,05	*	0,06
F4	0,29	0,25	0,19	0,07	0,04	*	0,09

F1	0,21	0,18	0,19	0,15	0,15	*	0,07
F2	0,24	0,19	0,20	0,12	0,06	Moyennes *	0,06
F3	0,27	0,22	0,18	0,13	0,04	*	0,05
F4	0,29	0,26	0,20	0,11	0,04	*	0,06

Modèle A+B	SODIUM échangeable (me/100g) dans l'horizon B					* Répétitions	* Modèle A
-----	*****					*	
FUMURES						Répétitions	*
F1	0,16	0,15	0,14	0,13	0,18	*	
F2	0,17	0,15	0,12	0,10	0,09	- 1 - *	
F3	0,16	0,16	0,13	0,09	0,07	*	
F4	0,15	0,14	0,12	0,10	0,08	*	

F1	0,16	0,15	0,14	0,17	0,15	*	
F2	0,19	0,16	0,11	0,10	0,09	- 2 - *	
F3	0,17	0,16	0,11	0,11	0,08	*	
F4	0,15	0,13	0,13	0,12	0,08	*	

F1	0,16	0,15	0,14	0,15	0,17	*	
F2	0,18	0,16	0,12	0,10	0,09	Moyennes *	
F3	0,17	0,16	0,12	0,10	0,08	*	
F4	0,15	0,14	0,13	0,11	0,08	*	

Modèle A+B	AMMONIUM échangeable (me/100g) dans l'Horizon A					Modèle A

Durées:	1er Jour	15ème Jour	30ème Jour	90ème Jour	180ème Jour	180ème Jour
FUMURES						Répétitions
F1	0,33	0,59	0,68	0,41	0,27	0,39
F2	0,51	0,92	1,11	0,67	0,34	- 1 -
F3	0,56	0,95	1,36	1,65	0,35	0,45
F4	0,44	0,74	1,31	0,79	0,37	0,56

F1	0,68	0,77	0,86	0,66	0,41	0,45
F2	1,04	1,18	1,77	0,67	0,38	- 2 -
F3	0,59	1,16	1,49	1,41	0,42	0,60
F4	0,58	1,03	1,51	0,64	0,43	0,53
=====						
F1	0,51	0,68	0,77	0,54	0,34	0,42
F2	0,78	1,05	1,44	0,67	0,36	Moyennes
F3	0,58	1,06	1,43	1,53	0,39	0,50
F4	0,51	0,89	1,41	0,72	0,40	0,53

Modèle A+B	AMMONIUM échangeable (me/100g) dans l'Horizon B					

FUMURES						Répétitions
F1	0,36	0,29	0,47	0,38	0,32	
F2	0,27	0,39	0,62	0,54	0,33	- 1 -
F3	0,20	0,39	0,73	1,04	0,68	
F4	0,32	0,57	1,07	1,37	0,55	

F1	0,46	0,31	0,52	0,46	0,41	
F2	0,32	0,38	0,60	0,54	0,52	- 2 -
F3	0,39	0,37	1,10	1,10	0,45	
F4	0,24	0,53	1,09	1,31	0,68	
=====						
F1	0,41	0,30	0,50	0,42	0,37	
F2	0,30	0,39	0,61	0,54	0,43	Moyennes
F3	0,30	0,38	0,92	1,07	0,57	
F4	0,28	0,55	1,08	1,34	0,62	

Modèle A+B	BILAN DU CALCIUM (mmol(+) / modèle)					*	Modèle A
-----	*****					*	-----
Durées: (0jour)	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	*	(0 J.) 180ème J.
Fumures	*****					*	*****
(paille)(h,A+B)	CALCIUM échangeable (mmol(+)) dans les modèles (Hor,A+B)* (hor,A)					*	
F1 (0,00)(41,64)	42,00	43,16	43,83	42,03	41,64	*	(24,00) 23,40
F2 (5,97)	48,09	45,50	43,95	40,10	42,48	Moyennes*	25,33
F3 (11,94)	46,56	49,52	41,24	38,15	38,78	*	29,08
F4 (17,91)	49,18	49,10	45,41	38,55	43,28	*	27,03

	CALCIUM recueilli dans les percolats (mmol(+)) /modèle					*	
F1	0,04	0,34	0,45	1,13	2,32	*	1,15
F2	0,12	0,80	1,76	2,72	5,23	Moyennes*	3,58
F3	0,16	1,12	9,79	12,28	15,95	*	5,37
F4	0,06	0,40	8,04	11,12	15,10	*	13,48

	Accroissement du CALCIUM échangeable dans les modèles (mmol(+)) /modèle					*	
F1	0,36	1,52	2,19	0,39	0,00	*	-0,60
F2	6,45	3,86	2,31	-1,54	0,84	Moyennes*	1,33
F3	4,92	7,88	-0,40	-3,49	-2,86	*	5,08
F4	7,54	7,46	3,77	-3,09	1,64	*	3,03

	Pourcentage de Ca apporté par la paille restant sous forme échangeable (%)					*	
F2-F1	102,01	39,20	2,01	-32,33	14,07	*	32,33
F3-F1	38,19	53,27	-21,69	-32,50	-23,95	*	47,57
F4-F1	40,09	33,17	6,82	-19,43	9,16	*	20,27

	Pourcentage de Ca apporté par la paille restant sous forme non-échangeable					*	
F2-F1	-3,35	53,10	76,05	105,70	37,19	*	26,97
F3-F1	60,80	40,20	43,47	39,11	9,80	*	17,09
F4-F1	59,80	66,50	48,80	63,65	19,49	*	10,89

	Pourcentage de Ca apporté par la paille qui est lixivié (%)					*	
F2-F1	1,34	7,71	21,94	26,63	48,74	*	40,70
F3-F1	1,01	6,53	78,22	93,38	114,15	*	35,34
F4-F1	0,11	0,34	42,38	55,78	71,36	*	68,84

Modèle A+B	BILAN DU MAGNESIUM (mmol(+) / modèle)						Modèle A

Durées; (0 J.) 1er Jour 15ème J. 30ème J. 90ème J. 180ème J.; (0 J.) 180ème J.							
Fumures	*****						
(paille)(h,A+B)	Mg échangeable dans les modèles (Horizon A+B)						(hor,A)
F1 (0,00) (8,51)	8,66	8,62	8,51	8,52	8,59	(5,43)	5,35
F2 (0,88)	9,38	8,78	8,45	8,10	8,14	Moyennes	5,30
F3 (1,75)	9,87	9,52	7,75	7,05	7,19	:	5,20
F4 (2,63)	10,27	10,26	8,43	7,00	7,40	:	4,28

Accroissement du Mg échangeable dans les modèles :							
F1	0,15	0,11	0,00	0,01	0,08	:	-0,08
F2	0,87	0,27	-0,06	-0,41	-0,37	Moyennes	-0,13
F3	1,36	1,01	-0,76	-1,46	-1,32	:	-0,23
F4	1,76	1,75	-0,08	-1,51	-1,11	:	-1,15

Mg recueilli dans les percolats (mmol+)/modèle) :							
F1	0,00	0,09	0,07	0,37	0,74	:	0,30
F2	0,01	0,22	0,72	1,47	2,15	Moyennes	1,34
F3	0,03	0,21	2,44	3,69	4,69	:	1,81
F4	0,01	0,14	2,15	4,34	5,33	:	4,41

Pourcentage de Mg apporté par la paille restant sous forme échangeable (%)							
F2-F1	81,82	18,18	-6,82	-47,73	-51,14	:	-5,68
F3-F1	69,14	51,43	-43,43	-84,00	-80,00	:	-8,57
F4-F1	61,22	62,36	-3,04	-57,79	-45,25	:	-40,68

Pourcentage de Mg apporté par la paille restant sous forme non-échangeable							
F2-F1	17,39	66,70	32,50	22,16	-8,41	:	-12,50
F3-F1	29,54	41,46	7,71	-5,60	-45,49	:	22,29
F4-F1	38,40	35,59	23,88	6,69	-28,94	:	-15,59

Pourcentage de Mg apporté par la paille qui est lixivié (%)							
F2-F1	0,80	15,11	74,32	125,57	159,55	:	118,18
F3-F1	1,31	7,11	135,71	189,60	225,49	:	86,29
F4-F1	0,38	2,05	79,16	151,10	174,18	:	156,27

Modèle A+B	FIXATION DU POTASSIUM DANS LES MODELES (A + B) ET (A)						Modèle A

Durées:	(0 jour)	1er jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	: (0 jour) 180ème J.

Potassium échangeable dans l' horizon A des modèles (mmol(+)/modèle)							
F1	(0,975)	1,000	1,050	1,050	1,100	1,075	: (0,975) 1,150
F2		2,875	3,450	3,375	2,875	2,225	: 2,700
F3		5,700	6,300	5,776	5,350	2,525	: 4,000
F4		9,075	9,200	8,575	6,325	4,225	: 5,950

Potassium échangeable dans l' horizon B des modèles (mmol(+)/modèle)							
F1	(0,60)	0,600	0,495	0,510	0,495	0,510	: :
F2		0,630	0,600	0,165	0,480	0,570	: :
F3		0,600	0,540	0,780	1,065	1,050	: :
F4		0,600	0,645	1,155	2,070	1,680	: :
=====							
Enrichissement en K échangeable des modèles (mmol(+)/modèle) Hor. A+B : (Hor. A)							
F1		0,025	-0,030	-0,015	0,020	0,010	: 0,175
F2		1,930	2,475	1,965	1,780	1,220	: 1,725
F3		4,725	5,265	4,981	4,840	2,000	: 3,025
F4		8,100	8,270	8,155	6,820	4,330	: 4,975
=====							
Potassium recueilli dans les Percolats (totaux cumulés) (mmol(+)/modèle)							
F1		0,001	0,007	0,010	0,048	0,094	: 0,346
F2		0,002	0,010	0,012	0,217	0,520	: 1,475
F3		0,004	0,012	0,016	0,151	1,077	: 2,003
F4		0,004	0,009	0,017	0,212	1,488	: 4,672
=====							
K de la paille restant sous forme non-échangeable dans les modèles (mmol(K)/modèle) (K ds.paille)							
F1	(0,00)	-0,026	0,023	0,005	-0,068	-0,104	: -0,521
F2	(4,08)	2,148	1,595	2,103	2,083	2,340	: 0,880
F3	(8,15)	3,421	2,873	3,153	3,159	5,073	: 3,122
F4	(12,23)	4,126	3,951	4,058	5,198	6,412	: 2,583

Pourcentage de K apporté par la paille qui est fixé (%)							
F2-F1		53,284	38,529	51,422	52,721	59,902	: 34,338
F3-F1		42,294	34,969	38,629	39,595	63,521	: 44,699
F4-F1		33,949	32,118	33,140	43,058	53,279	: 25,380
=====							
Pourcentage de K apporté par la paille qui est lixivié dans les percolats (%)							
F2-F1		0,025	0,074	0,049	4,142	10,441	: 27,672
F3-F1		0,037	0,061	0,074	1,264	12,061	: 20,331
F4-F1		0,025	0,016	0,057	1,341	11,398	: 35,372
=====							
Pourcentage de K apporté restant dans les modèles sous forme échangeable (%)							
F2-F1		46,691	61,397	48,529	43,137	29,657	: 37,990
F3-F1		57,669	64,969	61,298	59,141	24,417	: 34,969
F4-F1		66,026	67,866	66,803	55,601	35,323	: 39,248

Modèle A+B	BILAN DU SODIUM DANS LES MODELES						*	Modèle A
-----	*****						*	-----
Durées:(0 J.)	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.		(0 J.) 180ème J.	
FUMURES	*****						*	*****
(paille)	SODIUM ECHANGEABLE dans les modèles (mmol /modèle) (Hor,A+B)						*	(HOR, A)
F1 (0,00) (0,59)	0,75	0,68	0,67	0,59	0,62		(0,35) 0,16	
F2 (0,14)	0,86	0,71	0,66	0,44	0,27	Moyennes	0,14	
F3 (0,28)	0,91	0,79	0,63	0,48	0,21	*	0,11	
F4 (0,41)	0,95	0,84	0,59	0,43	0,22	*	0,14	

	Accroissement du SODIUM échangeable dans les modèles						*	
F1	0,16	0,09	0,08	0,00	0,03		-0,19	
F2	0,27	0,12	0,07	-0,15	-0,32	Moyennes	-0,21	
F3	0,32	0,20	0,04	-0,11	-0,38	*	-0,24	
F4	0,36	0,25	0,10	-0,16	-0,37	*	-0,21	

	SODIUM recueilli dans les percolats (totaux cumulés) (mmol(+)/modèle)							
F1	0,00	0,06	0,12	0,27	0,62	*	0,21	
F2	0,00	0,08	0,16	0,45	0,65	Moyennes	0,34	
F3	0,01	0,09	0,24	0,48	0,70	*	0,40	
F4	0,01	0,06	0,22	0,56	1,85	*	0,52	

	Pourcentage de Na apporté par la paille restant sous forme échangeable (%)							
F2-F1	78,57	21,43	-7,14	-107,14	-250,00	:	-14,29	
F3-F1	57,14	39,29	-14,29	-39,29	-146,43	:	-17,86	
F4-F1	48,78	39,02	4,88	-39,02	-97,56	:	-4,88	

	Pourcentage de Na apporté par la paille restant sous forme non-échangeable (%)							
F2-F1	20,29	65,07	77,75	81,43	325,43	:	18,57	
F3-F1	40,43	52,34	69,91	66,32	216,75	:	47,50	
F4-F1	50,02	62,00	70,38	70,34	-102,60	:	28,29	

	Pourcentage de Na apporté par la paille qui est lixivié (%)							
F2-F1	1,14	13,50	29,39	125,71	24,57	:	95,71	
F3-F1	2,43	8,38	44,38	72,96	29,68	:	70,36	
F4-F1	1,20	-1,02	24,74	68,68	300,16	:	76,59	

Modèle A+B	EVOLUTION DES BASES (Ca, Mg, K, Na) DANS LES MODELES						* Modèle A
-----	*****						* -----
Durées:	(0jour)	1er Jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	*(0jour) 180ème J.
*****	*****						*****
Fumures	Somme des BASES ECHANGEABLES dans les modèles (mmol(+)/modèle)						
(paille) (sols)							*(sol)
F1 (0,00) (52,31)	52,98	53,99	54,56	52,73	52,42		*(30,75) 30,08
F2 (11,06)	61,82	59,04	56,60	51,97	53,68	Moyennes	* 33,20
F3 (22,11)	63,75	66,66	56,16	52,07	49,74		* 38,38
F4 (33,17)	70,06	70,05	64,24	54,37	56,79		* 37,38
*****	*****						*****
Modèle A+B	Somme des BASES (Ca, Mg, K, Na) recueillies dans les PERCOLATS (mmol(+)/modèle)						
F1	0,04	0,49	0,70	1,77	3,68		* 1,77
F2	0,13	1,11	2,65	6,40	9,96	Moyennes	* 6,03
F3	0,20	1,43	12,49	16,88	22,47		* 9,18
F4	0,08	0,58	10,48	16,29	23,78		* 21,63
*****	*****						*****
	Accroissement des BASES ECHANGEABLES dans les modèles (mmol(+)/modèle)						
F1	0,67	1,68	2,25	0,42	0,11		* -0,68
F2	9,51	6,73	4,29	-0,34	1,37	Moyennes	* 2,45
F3	11,44	14,35	3,85	-0,24	-2,57		* 7,63
F4	17,75	17,74	11,93	2,06	4,48		* 6,63
*****	*****						*****
	Pourcentage de Bases apportées par la paille restant sous forme échangeable (%)						
F2-F1	79,93	45,66	18,44	-6,87	11,39		* 28,21
F3-F1	48,71	57,30	7,24	-2,99	-12,12		* 37,54
F4-F1	51,49	48,42	29,18	4,94	13,17		* 22,01
-----	-----						-----
	Pourcentage des Bases apportées par la paille qui sont lixiviées (%)						
F2-F1	0,81	5,61	17,63	41,86	56,78		* 38,52
F3-F1	0,72	4,25	53,32	68,34	84,98		* 33,51
F4-F1	0,12	0,27	29,48	43,77	60,60		* 59,87
-----	-----						-----
	Pourcentage des Bases apportées par la paille restant sous forme non-échangeable (%)						
F2-F1	19,26	48,73	63,92	65,01	31,83		* 33,27
F3-F1	50,57	38,44	39,44	34,64	27,14		* 28,95
F4-F1	48,39	51,31	41,33	51,28	26,23		* 18,12
*****	*****						*****

Modèle A+B	FIXATION DU POTASSIUM DANS LES MODELES (A + B) ET (A) :						Modèle A
Durées:	(0 jour)	1er jour	15ème J.	30ème J.	90ème J.	180ème J.	(0 jour) 180ème J.
Potassium échangeable dans l' horizon A des modèles (mmol(+)) / modèle							
F1	(0,975)	1,000	1,050	1,050	1,100	1,075	(0,975) 1,150
F2		2,875	3,450	3,375	2,875	2,225	2,700
F3		5,700	6,300	5,776	5,350	2,525	4,000
F4		9,075	9,200	8,575	6,325	4,225	5,950
Potassium échangeable dans l' horizon B des modèles (mmol(+)) / modèle							
F1	(0,60)	0,600	0,495	0,510	0,495	0,510	:
F2		0,630	0,600	0,165	0,480	0,570	:
F3		0,600	0,540	0,780	1,065	1,050	:
F4		0,600	0,645	1,155	2,070	1,680	:
Enrichissement en Potassium échangeable de l'horizon A des modèles (mmol(+)) / modèl							
F1		0,025	0,075	0,075	0,125	0,100	0,175
F2		1,900	2,475	2,400	1,900	1,250	1,725
F3		4,725	5,325	4,801	4,375	1,550	3,025
F4		8,100	8,225	7,600	5,350	3,250	4,975
Enrichissement en potassium échangeable de l'horizon B des modèles (mmol(+)) / modèl							
F1		0,000	-0,105	-0,090	-0,105	-0,090	:
F2		0,030	0,000	-0,435	-0,120	-0,030	:
F3		0,000	-0,060	0,180	0,465	0,450	:
F4		0,000	0,045	0,555	1,470	1,080	:
Potassium recueilli dans les Percolats (totaux cumulés) (mmol(+)) / modèle A							
F1	(	0,008	0,019		0,055	0,114	) ; 0,114
F2	(	0,065	0,152	cf. N.B.	0,447	0,762	) ; 0,762
F3	(	0,108	0,365		0,865	1,595	) ; 1,595
F4	(	0,258	0,627		2,641	3,222	) ; 3,222
(K ds.paille) POTASSIUM non échangeable restant dans l' horizon A des modèles							
F1 (0,00)	mmol(K)	-0,033	-0,094		-0,180	-0,214	-0,289
F2 (4,08)		2,115	1,453		1,733	2,068	1,593
F3 (8,15)		3,317	2,460		2,910	5,005	3,530
F4 (12,23)		3,872	3,378		4,239	5,758	4,033
Potassium recueilli dans les percolats (totaux cumulés) (mmol(+)) / modèle A+B							
F1		0,001	0,007	0,010	0,048	0,094	:
F2		0,002	0,010	0,012	0,217	0,520	:
F3		0,004	0,012	0,016	0,151	1,077	:
F4		0,004	0,009	0,017	0,212	1,488	:
Potassium non échangeable fixé dans l' horizon B (mmol(+))/modèle)							
F1		0,007	0,117		0,112	0,110	:
F2		0,033	0,142		0,350	0,272	:
F3		0,104	0,413		0,249	0,068	:
F4		0,254	0,573		0,959	0,654	:
Pourcentage de K apporté restant non échangeable ou fixé dans l'horizon A (%)							
F2-F1		52,647	37,917		46,887	55,931	46,127
F3-F1		41,104	31,337		37,914	64,037	46,859
F4-F1		31,930	28,389		36,132	48,831	35,339
Pourcentage de K apporté par la paille qui est fixe dans l'horizon B (%)							
F2-F1		0,637	0,613		5,833	3,971	:
F3-F1		1,190	3,632		1,681	-0,515	:
F4-F1		2,020	3,729		6,926	4,448	:
N.B. : Les quantités cumulées de potassium lixivié dans l' horizon A des modèles (A+B) sont supposées égales aux quantités recueillies dans les percolats sous les modèles (A sans B)							

Modèles A+B	AMMONIUM échangeable et fixé (me ou mmol(+)) dans les modèles					Modèles A
-----	*****					-----
Durées:	1er Jour	15ème Jour	30ème Jour	90ème Jour	180ème Jour	180ème Jour
FUMURES	AMMONIUM échangeable (me ou mmol(+)) dans les modèles (Hor,A+B)					(Hor,A seul)
F1	1,89	2,15	2,68	1,98	1,41	1,05
F2	2,40	3,21	4,52	2,49	1,55	1,25
F3	1,90	3,22	4,96	5,43	1,83	1,31
F4	1,70	3,05	5,15	3,81	1,93	1,36

	AMMONIUM fixé (non-échangeable) dans les modèles (Hor,A+B)					
F1	3,39	4,14	4,88	3,78	3,59	
-						Sommes des
-						moyennes
F4	3,71	5,11	6,86	6,57	4,96	

Modèle A+B pH (H2O et KCl) de l'horizon A des modèles

***** Durées: 1 jour 15 jours 30 jours 90 jours 180 jours ***** 180 jours

***** pH (H2O) *****

***** Répétitions *****

1	*	5,20	5,60	5,70	5,90	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	
2	*	5,20	5,90	6,10	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30
3	*	5,20	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10
4	*	5,20	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10
1	*	5,60	5,95	5,95	5,80	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95
2	*	5,20	5,95	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20
3	*	5,20	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05
4	*	5,30	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
1	*	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20
2	*	5,60	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70
3	*	5,10	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70
4	*	5,10	5,80	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
1	*	4,70	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30
2	*	5,00	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
3	*	5,10	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90
4	*	5,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10
1	*	4,70	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30
2	*	4,95	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60
3	*	5,00	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90
4	*	5,00	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05
1	*	4,70	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
2	*	4,95	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40
3	*	5,00	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90
4	*	5,00	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05
1	*	0,45	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
2	*	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
3	*	0,30	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
4	*	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

***** pH (KCl) *****

***** Répétitions *****

***** Durées: 1 jour 15 jours 30 jours 90 jours 180 jours ***** 180 jours

***** Fumures *****

Modele A+B pH (H2O et KCl) de l' horizon B des modèles

 ***** Fumures : 1 (0%) 2 (2,5%) 3 (5%) 4 (7,5%)*****

*****pH (H2O) *****

Durées		***** Répétitions			
1 jour	*	7,00	7,00	6,80	7,00 *
15 jours	*	6,70	6,70	6,70	6,70 * 1
30 -	*	6,60	6,50	6,00	6,40 *
90 -	*	6,50	6,10	5,90	5,90 *
180 -	*	6,50	6,30	5,50	5,60 *

1 jour	*	6,90	6,70	6,70	7,00 *
15 jours	*	6,60	6,60	6,50	6,60 * 2
30 -	*	6,50	6,60	6,10	6,10 *
90 -	*	6,70	6,40	6,50	6,10 *
180 -	*	6,70	6,70	6,00	5,80 *
=====					
1 jour	*	6,95	6,85	6,75	7,00 *
15 jours	*	6,65	6,65	6,60	6,65 *Moyennes
30 -	*	6,55	6,55	6,05	6,25 *
90 -	*	6,60	6,25	6,20	6,00 *
180 -	*	6,60	6,50	5,75	5,70 *

***** pH (KCl) *****					
1 jour	*	6,10	6,10	6,00	6,10 *
15 jours	*	6,00	6,20	6,20	6,20 * 1
30 -	*	5,70	5,80	5,50	6,00 *
90 -	*	5,80	5,20	5,00	5,10 *
180 -	*	5,60	5,40	4,60	4,80 *

1 jour	*	6,00	6,00	6,10	6,00 *
15 jours	*	5,80	6,10	6,10	6,10 * 2
30 -	*	5,80	5,90	5,60	5,70 *
90 -	*	5,90	5,60	5,60	5,30 *
180 -	*	5,90	5,70	5,10	4,90 *
=====					
1 jour	*	6,05	6,05	6,05	6,05 *
15 jours	*	5,90	6,15	6,15	6,15 *Moyennes
30 -	*	5,75	5,85	5,55	5,85 *
90 -	*	5,85	5,40	5,30	5,20 *
180 -	*	5,75	5,55	4,85	4,85 *

***** pH (H2O) - pH (KCl) *****					
1 jour	*	0,90	0,80	0,70	0,95 *
15 jours	*	0,75	0,50	0,45	0,50 *Moyennes
30 -	*	0,80	0,70	0,50	0,40 *
90 -	*	0,75	0,85	0,90	0,80 *
180 -	*	0,85	0,95	0,90	0,85 *

Modèle A+B		TAUX DE SATURATION (SBE / CEC %) DANS L'HORIZON A					Modèle A

Durées: 1er Jour 15ème J, 30ème J, 90ème J, 180ème J, Répétitions 180ème J,							
FUMURES							
F1	61,9	62,3	63,9	65,4	65,0	:	62,6
F2	76,0	68,4	70,2	64,5	69,8	- 1 -	64,1
F3	75,3	80,0	64,9	64,7	59,5	:	75,4
F4	88,3	82,1	77,7	68,6	79,9	:	65,5

F1	61,1	64,6	65,7	66,2	67,3	:	65,7
F2	73,7	69,7	71,0	67,7	70,6	- 2 -	75,2
F3	78,5	78,9	72,0	76,7	72,7	:	80,4
F4	82,3	81,0	79,3	79,5	79,3	:	84,2
=====							
F1	61,5	63,5	64,8	65,8	66,2	:	64,2
F2	74,9	69,1	70,6	66,1	70,2	Moyennes :	69,7
F3	76,9	79,5	68,5	70,7	66,1	:	77,9
F4	85,3	81,6	78,5	74,1	79,6	:	74,9

		TAUX DE SATURATION (SBE / CEC %) DANS L'HORIZON B					
Durées: 1er Jour 15ème J, 30ème J, 90ème J, 180ème J, Répétitions							
FUMURES							
F1	89,1	84,4	90,4	85,8	92,1	- 1 -	:
F4	88,5	97,8	91,8	70,9	80,5	:	:

F1	89,5	92,2	92,6	92,0	93,4	- 2 -	:
F4	90,0	104,4	92,7	75,0	82,5	:	:
=====							
F1	89,3	88,3	91,5	89,4	92,8	Moyennes :	:
F4	89,3	101,1	92,3	73,0	81,5	:	:

Modèle A+B	Déficit de Saturation en bases (cmol(+) kg ⁻¹)					Modèle A
-----	CEC(pH:7) - SBE(pH:7)					-----
	Durées: 1er jour 15ème jour 30ème jour 90ème jour 180ème jour					Répétitions
						180ème jour

Déficit de saturation dans l' horizon A						
Fumures						
F1	7,76	7,77	7,30	6,75	6,86	7,15
F2	5,09	6,50	6,04	7,02	6,06	- 1 - 6,94
F3	5,37	4,28	7,43	7,24	8,18	4,81
F4	2,64	3,99	4,94	6,54	4,74	6,83

F1	7,97	6,96	6,63	6,31	5,94	6,31
F2	5,60	6,18	5,81	6,19	5,53	- 2 - 4,67
F3	4,64	4,53	5,84	4,63	5,32	3,88
F4	4,02	4,31	4,49	4,22	4,25	3,19

F1	7,87	7,37	6,97	6,53	6,40	6,73
F2	5,35	6,34	5,93	6,61	5,80	Moyennes 5,81
F3	5,01	4,41	6,64	5,94	6,75	4,35
F4	3,33	4,15	4,72	5,38	4,50	5,01

Déficit de saturation dans l' horizon B						
Fumures						
F1	1,77	2,62	1,61	2,14	1,21	- 1 -
F4	1,88	0,35	1,27	4,28	2,65	

F1	1,92	1,64	1,84	1,75	1,08	- 2 -
F4	1,60	-0,69	1,11	3,65	2,42	

F1	1,85	2,13	1,73	1,95	1,15	Moyennes
F4	1,74	-0,17	1,19	3,97	2,54	

BIBLIOGRAPHIE

+++++++

- BLOSSER, D.L., JENNY, H., 1971- Correlations of pH and percent base saturation as influenced by soil-forming factors. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 1017-1018.
- BLUME H.P., 1988- The fate of iron during soil formation in humid-temperate environments. *in: Iron in Soils and Clay Minerals*, p: 749-777 (J.W. Stucki et al. eds) NATO ASI Series, D. Reidel Publishing Company.
- BOISSEZON P.de, 1970- Etude du complexe absorbant des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* VIII (4), 391-418.
- BOISSEZON P.de, 1977- Essai de détermination du rôle des matières organiques dans la capacité d'échange des sols ferrallitiques. *Science du sol-Bulletin de l'AFES*, n°2, 61-68.
- BOISSEZON P.de et BONZON B., 1986- Effets de l'apport de fumier sur les caractéristiques chimiques d'un sol ferrallitique ivoirien. *Cah. ORSTOM, sér. pédol.* XXII (3), 329-355.
- BOISSEZON P. de, 1988- Effets de l'enfouissement de paille de luzerne sur la capacité d'échange d'un sol brun sur limon des plateaux. *Cah. ORSTOM. sér. Pédol.* XXIV, (4), 337-339
- BOISSEZON P. de, GAVINELLI E., BELLIER G., BRION J.C., FARDOUX J., 1992- Capacité d'échange cationique provenant de l'enfouissement de paille de luzerne dans un sol brun sur limon des plateaux. *Cah. ORSTOM. sér. Pédol.* sous presse.
- BRADY N.C., 1990- Soil Reaction: Acidity and Alkalinity. *in: The Nature and properties of soils.* Maxwell Macmillan Internat. Editions, Tenth edition, chap.8, pp: 213-251.
- BREMNER J.M., GENRICH D.A., 1990- Characterization of sand, silt, and clay fractions of some Mollisols. *in: Soil colloids and their associations in aggregates.* (édité par Boodt M.F.de, Hayes M.H.B., Herbillon A. New York, Plenum Press 1990) pp: 423-438.
- BRUCKERT S. et KILBERTUS G., 1980- Fractionnement et analyse des complexes organo-minéraux des sols bruns et de chernozem. *Plant and Soil*, 57, 271-295
- CERRI C.C., JENKINSON D.S., 1981- Formation of microbial biomass during the decomposition of ¹⁴C-labelled ryegrass in soil. *J. of Soil Sci.* 32, 619-626.
- CURTIN D., SMILLIE G.W., 1979- Origin of the pH-dependent cation exchange capacities of Irish soil clays. *Geoderma*, 22, 213-224.
- DABIN B. 1976- Méthode d'extraction et de fractionnement des matières humiques du sol. Application à quelques études pédologiques et agronomiques dans les sols tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XIV (4); 287-297.
- DELAS J., 1971- Evolution des propriétés d'un sol sableux sous l'influence d'apports massifs et répétés de matières organiques de différentes origines. *Ann. Agron.* 22 (5), 585-610.
- DOMMERMUES Y., 1960- Application de la méthode de numération cinétique à la caractérisation de quelques groupements physiologiques de microorganismes telluriques. *Ann. Inst. Pasteur* 98, 887-901.
- DRAKE E.H., MOTTO H.L., 1982- An analysis of the effect of clay and organic matter content on the cation exchange capacity of New Jersey Soils. *Soil Sci.* 133(5): 281-288.
- FARDEAU J.C., GUIRAUD G., THIERY J., MOREL C., BOUCHER B., 1988- Taux net annuel de minéralisation de la matière organique des sols de grande

- culture de Beauce. Conséquence pour l'azote. *C. R. Acad. Agri. Fr.* 74 (8); 61-70.
- FAUCK R., MOUREAUX Cl., THOMANN Ch., 1969- Bilan de l'évolution des sols de Sefa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. *Agron. Tropi.* 1969 (3), 263-301.
- FELLER C., 1979- Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. *Cah. ORSTOM, sér. pédol.* XVII, (4), 339-346.
- FISCHER W.R. 1988- Microbiological reactions of iron in soils. in: *Iron in Soils and clay Minerals* (NATO ASI series, J.W. STUCKI et al. eds) p: 715-748.
- GAUR A.C., 1964- Influence de l'acide humique et de la paille de blé en décomposition sur la capacité d'échange cationique du sol. *Bul. AFES* 1964 (6), 266-270.
- GODEFROY J., 1974- *Evolution de la matière organique du sol sous culture du bananier et de l'ananas. Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique.* Université de Nancy I. (Thèse d'ing. docteur). pp: 79-82 et 126-130.
- HALLAM M.J., BARTHOLOMEW W.W., 1953- Influence of rate of plant residue addition in accelerating the decomposition of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 17 (4), 365-368.
- HARADA Y., INOKO A., 1980- The measurement of cation exchange capacity of composts for estimation of the degree of maturity. *Soil Sci. Plant Nutri.* 26, 127-134.
- JEANROY E., 1983- *Diagnostic des formes du fer dans les pédogénèses tempérées. Evaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectrométrie Mossbauer.* Thèse, Université de Nancy 1. (24-06-83), 168 p.
- JENKINSON D.S., 1968- Chemical tests for potentially available Nitrogen in soil. *J. Sci. Food Agr.* 19: 160-168.
- JENKINSON D.S., 1971- Studies on the decomposition of C¹⁴ labelled organic matter in soil. *Soil Sc.* 111, 64-70
- JENKINSON D.S., 1977- Studies on the decomposition of plant material in soil. IV. The effect of rate of addition. *J. Soil Sci.* 28, 417-423.
- JENKINSON D.S., AYANABA A., 1977- Decomposition of carbon-14 labeled plant material under tropical conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 41, 912-915.
- KEENEY D.R., NELSON D.W., 1982- Nonexchangeable Ammonium in: *Methods of Soil Analysis. Part 2, Second Edition* pp: 687-693 (A.L. Page et Al ed.) Amer. Soc. Agron. and Soil Sc. Soc. Amer. (Agronomy n° 9)
- KELLEY C.W., THOMAS R.P., 1942- A method of estimating the organic exchange complex of a soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 7, 201-206.
- LAX A., ROIG A., COSTA F., 1986- A method for determining the cation-exchange capacity of organic materials. *Plant and Soil*, 94 (3), 349-355.
- LAX A., 1991- Cation exchange capacity, induced in calcareous soils by fertilization with manure. *Soil Sci.* 151 (2): 174-178.
- Mc GEORGE W.T., 1931- The base exchange properties of soil organic matter. *J. Am. Soc. Agron.* 23(5), 331-336.
- Mc GEORGE W.T., 1934- Organic base exchange compounds in soils. *J. Am. Soc. Agron.* 26, 575-579.
- MYERS H.E. 1938- Physico-chemical reactions between organic and inorganic soil colloids as related to aggregate formation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 2, 77
- N'DAYEGAMIYE A., DUBE A., 1986- Effet de l'incorporation de matières ligneuses sur l'évolution des propriétés chimiques du sol et sur la croissance des plantes. *Can. J. Soil Sci.* 66(4), 623-631.

- N'DAYEGAMIYE A., DUBE A.**, 1986- Effet de l'incorporation de matières ligneuses sur l'évolution des propriétés chimiques du sol et sur la croissance des plantes. *Can. J. Soil Sci.* **66**(4), 623-631.
- N'DAYEGAMIYE A.**, 1990- Effets à long terme d'apports de fumier solide de bovins sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol et de la production de maïs-ensilage. *Can. J. Plant Sci.* **70**, 767-775.
- OADES J.M.**, 1990- Associations of colloids in soil aggregates. in: *Soil colloids and their associations in aggregates* (Plenum Press New York NATO ASI, serie B) pp: 463-483.
- PAGE A.L., BURGE W.D., GANJE T.J.**, 1967- Potassium and ammonium fixation by vermiculite soils. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* **31**, 337-341.
- PAL D., BROADBENT F.E.**, 1975- Kinetics of rice straw decomposition in soils. *J. Environ. Qual.* **4**(2), 256-260.
- PEECH, M.** 1941- Availability of ions in light sandy soils as affected by soil reaction. *Soil Sci.* **51**: 473-486.
- PELLOUX P., DABIN B., FILLMANN G., GOMEZ P.**, 1971- *Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols.* ORSTOM, sér. Initiations-Documentations Techniques n° 17, 112 p.
- PRATT P.F.**, 1957- Effect of fertilizers and organic materials on the cation exchange capacity of an irrigated soil. *Soil Sci.* **83**, (2), 85-89.
- ROBERT M., TROCME S.**, 1979- Le potassium. in: *Pédologie 2. Constituants et propriétés du Sol.* (M. BONNEAU et B. SOUCHIER éd. Masson-Paris) pp: 379-385.
- ROTH C.B., JACKSON M.L., SYERS J.K.**, 1969- Deferration effect on ferrous-ferric iron ratio and CEC of vermiculites and Soil. *Clays Clay miner.*, **17**: 253-264.
- SWIFT R.S., POSNER A.M.**, 1976- Humification of plant materials: Properties of humic acid extracts. *Internat. Symposium on Soil organic matter studies. Brunswick (Sept. 76)* Paper n° IAEA-SM-211/19.
- TOTH S.J.**, 1939- The effect of iron oxyde removal on some properties of soil colloids. *Soil Sci.* **48**, 385-401.
- TECHNICON autoanalyser methodology**, 1964- Micro-glucose procedure. ref: P4-3R 610-1-4.
- TIESSEN H., STEWART J. W. B.**, 1983- Particle-size Fractions and their Use in studies of Soil Organic Matter: II. Cultivation Effects on Organic Matter Composition in Size Fraction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **47** : 509-514.

TABLE DES MATIERES

=====

Introduction	3
1ère Partie : EVOLUTION DES MATIERES ORGANIQUES.....	5
1.1.: <u>Matériel et méthodes</u>	
1.1.1.: Sol utilisé et constitution des modèles.....	8
1.1.2.: Méthodes analytiques.....	11
1.2.: <u>Evolution des teneurs en carbone dans les modèles</u>	
1.2.1.: Evolution des teneurs en carbone dans l' horizon A.....	13
1.2.2.: Evolution des teneurs en carbone dans l' horizon B.....	21
1.3.: <u>Evolution des teneurs en azote dans les modèles</u>	
1.3.1 : Evolution des teneurs en azote dans l' horizon A.....	25
1.3.2.: Evolution des teneurs en azote dans l' horizon B.....	29
1.4.: <u>Evolution de C et de N dans les fractions granulométriques</u>	
1.4.1.: Influence des doses de paille ajoutées sur le carbone contenu dans les fractions granulométriques.....	33
1.4.2.: Influence des doses de paille ajoutées sur l'azote contenu dans les fractions granulométriques.....	38
1.4.3.: Evolution du carbone contenu dans les différentes fractions granulométriques en fonction de la durée d' incubation.....	40
1.4.4.: Evolution de l' azote contenu dans les différentes fractions granulométriques en fonction de la durée d'incubation.....	42
1.4.5.: Evolution du rapport C/N des matières organiques contenues dans les fractions granulométriques.....	44
1.5.: <u>Evolution des matières humiques dans les modèles.</u>	
1.5.1.: Evolution des matières humiques dans l' horizon A.....	45
1.5.2.: Evolution des matières humiques dans l' horizon B.....	50
1.6.: <u>Evolution des polysaccharides dans les modèles.</u>	
1.6.1.: Evolution des polysaccharides dans l'horizon A.....	52
1.6.2.: Evolution des polysaccharides dans l'horizon B.....	56
1.7.: <u>Evolution et bilan des matières organiques dans les modèles</u>	
1.7.1.: Pertes de Carbone.....	57
1.7.2.: Pertes d'Azote.....	61
1.8.: <u>Matières organiques lixiviées</u>	
1.8.1.: Carbone recueilli dans les percolats.....	66
1.8.2.: Azote recueilli dans les percolats.....	70
1.9.: <u>Conclusions sur l'évolution des matières organiques.....</u>	76
2ème Partie : EVOLUTION DU COMPLEXE D' ECHANGE CATIONIQUE.....	79
2.1.: <u>Matériel et méthodes.....</u>	83
2.2.: <u>Capacité d' échange cationique des modèles</u>	
2.2.1.: Capacité d'échange cationique de l'horizon A.....	85
2.2.2.: Capacité d'échange cationique des fractions granulométriques..	93
2.2.3.: Capacité d'échange cationique de l'horizon B.....	96
2.3.: <u>Garniture cationique du complexe adsorbant des modèles</u>	
2.3.1.: Evolution des cations échangeables dans les horizons A et B..	100
2.3.2.: Evolution des cations échangeables dans l'ensemble des modèles	06
2.3.3.: Effets de l'apport de paille sur la garniture cationique des modèles.....	107
2.4.: <u>Eluviation des bases et bilan cationique des modèles</u>	
2.4.1.: Bases recueillies dans les percolats.....	112

2.4.2.:	Relation entre les bases apportées par la paille et les cations recueillis dans les percolats.....	117
2.4.3.:	Cations sous forme non-échangeable.....	121
2.5.:	<u>Lessivage des sesquioxydes</u>	
2.5.1.:	Dynamique du fer dans les modèles.....	126
2.5.2.:	Dynamique de l'aluminium dans les modèles.....	132
2.6.:	<u>Evolution du pH des horizons A et B en relation avec le taux et le déficit de saturation</u>	
2.6.1.:	Evolution du pH (H ₂ O et KCl) des horizons A ET B.....	133
2.6.2.:	Relation entre le pH et le taux de saturation.	135
2.6.3.:	Relation entre le pH et le déficit de saturation.....	138
2.7.:	<u>Conclusions sur le complexe d'échange cationique des modèles...</u>	145
Annexes:	RESULTATS ANALYTIQUES	149
	Bibliographie.....	181
	Table des matières.....	185
RÉSUMÉ	- Mots-clés.....	dos de la couverture

+++++

R É S U M É

=====

L'effet de l'enfouissement de différentes doses de paille de luzerne dans un sol brun sur limon a été étudié sur des modèles de laboratoire, à deux horizons (A et B), pendant six mois.

Le suivi de l'évolution des matières organiques dans l'horizon A, montre que l'enfouissement de paille accélère en début d'incubation la décomposition du carbone et de l'azote organique provenant du sol. Cet effet d'incitation est plus marqué et plus prolongé pour les matières organiques du sol contenues dans les fractions granulométriques grossières (0,2 à 2mm), et pour les matières non-extractibles (Humine et matières organiques légères). Il est indépendant des doses de paille ajoutées.

Si l'on retranche le stock de matières organiques du sol dont la décomposition est accélérée par cet effet d'incitation (I_c) on peut évaluer les stocks de carbone restant à l'instant (t), comme étant la somme de deux compartiments provenant du sol ($C_0 - I_c$) et de la paille ajoutée ($\alpha \times C_{p1}$): $C \text{ restant} = (C_0 - I_c) \times e^{-K_c \times t} + \alpha \times C_{p1} \times e^{-K_{cp} \times t}$
La constante journalière de décomposition du carbone du sol (K_{c0}) est dix fois plus faible que celle de la paille enfouie (K_{cp}).

Le carbone organique temporairement illuvié dans l' horizon B des modèles, est principalement sous forme d'humine d' insolubilisation. L' illuviation de l'azote dans cet horizon est également transitoire, mais plus tardive, et en grande partie sous forme d'ammonium échangeable et fixé.

Les pertes de carbone par lixiviation hors des modèles sont surtout importantes pendant les deux premiers mois, et arrivent à représenter 11% des pertes totales de carbone. Les flux d'azote lixiviés sont plus faibles pendant les premiers mois; mais ils augmentent progressivement. Au total les pertes par lixiviation sont relativement plus importantes, par rapport aux pertes totales, pour l'azote que pour le carbone.

Dès le premier jour, la capacité d'échange cationique (à pH:7) du mélange sol-paille est inférieure à la somme des CEC des deux constituants. Cependant, pour chaque durée d' incubation, il existe une corrélation très significative entre la CEC de l'horizon A et la teneur en carbone restant qui provient de la paille enfouie dans cet horizon. La CEC des matières organiques provenant de la paille passe en six mois de 100 à 230 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ de carbone.

Dans les modèles enrichis en paille, la diminution progressive de la CEC de l' horizon B paraît liée à une diminution des charges permanentes des argiles 2:1 par suite de la fixation d'ammonium et de potassium.

Tandis que 90% du potassium provenant de la paille reste dans les modèles à l'état échangeable ou fixé, les pertes de magnésium recueilli dans les percolats représentent plus de 150% de Mg apporté par la paille. L'enfouissement de paille provoque un appauvrissement en Mg.

Le phénomène le plus spectaculaire qui paraît lié à l'enfouissement de la paille de luzerne dans ce sol brun sur limon est sans conteste la mobilisation du fer dans l'horizon A des modèles, et l'illuviation de la plus grande partie du fer lixivié sous forme de ferrihydrite dans l'horizon B.

Mots-clés: Amendement organique - Brunisol - Bilan organique - Capacité d' échange cationique (CEC) - Bilan cationique - Recherche expérimentale (Modèle de laboratoire).